Fachhochschule Düsseldorf
Institut für Strömungsmaschinen
Studiengang Konstruktionstechnik

Diplomarbeit

Theoretische und experimentelle Untersuchung zum Schwingungsverhalten eines Windungslegers

Andreas Kleinefeldt
Mat. Nr.: 316 748

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Uwe Plociennik

01/2000

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1
1.1 Position und Aufgabe des Windungslegers 2
1.2 Historischer Rückblick 6
1.3 Aufbau des Windungslegers 8
1.4 Varianten 9
2. Theoretische Schwingungsanalyse 11
2.1 Modellierung 12
2.2 Modellauswahl und Parameterintervalle 15
2.3 Ergebnis 17
2.4 Programm 34
3. Experimentelle Untersuchung 45
3.1 Versuchsaufbau und Datenakquirierung 45
3.2 Motordrehzahl 46
3.3 Korrelation zwischen Motorleistung und Walzgeschwindigkeit 48
3.4 Stömungswiderstand 51
3.4.1 Theoretischer Strömungswiderstand 53
3.5 Frequenzanalyse 57
3.6 Fehlerrechnung 61
3.7 Meßwerte Motor 63
4. Zusammenfassung 65
5. Literaturverzeichnis 66

1. Einleitung

Bei der Walzung von Draht geht die Tendenz zu immer höheren Walzgeschwindigkeiten. Heute werden für neue Drahtstraßen schon Walzgeschwindigkeiten von 120 m/s gefordert. Aus diesem Grund sollen Abschätzungen für die Auslegung eines Windungslegers bei Walzgeschwindigkeiten von $v_w = 140$ m/s unter strukturmechanischen und aerodynamischen Gesichtspunkten durchgeführt werden.

Die Untersuchung soll in folgenden Schritten vorgenommen werden:

- Unter rein mechanischen Gesichtspunkten ist die kritische Drehzahl des Windungslegers anhand einer Parameterstudie abzuschätzen. Die zu variierenden Parameter sollen den Einfluß der Lageranordnung, der Masse des Überhanges und die Steifigkeit der Welle berücksichtigen. Zunächst sind die bei der bisherigen Konstruktion durchgeführten Berechnungen nachzuvollziehen und gegebenenfalls dann zu erweitern. Mit den Ergebnissen der Parameterstudie soll in Zukunft bei der Konstruktion des Windungslegers eine höhere Eigenfrequenz erzielt werden. Es ist notwendig, die Eigenfrequenz zu erhöhen, da diese die maximale Drehzahl des Windungslegers und somit die Walzgeschwindigkeit beschränkt.
- Bisherige Untersuchungen der SMS AG haben eine hohe Leerlaufleistung des Windungslegers ergeben. Hinsichtlich möglicher Einflussgrößen wie Lagerreibung und Aerodynamik soll eine Abschätzung für die Leerlaufleistung bei höheren Walzgeschwindigkeiten erfolgen.
- Zur Untersuchung der aerodynamischen Einflüsse zum Schwingungsverhalten des Windungslegers soll eine Vergleichsmessung mechanischer Schwingungen am Gehäuse des Windungslegers zu aerodynamisch erzeugten Druckschwankungen erfolgen.
- Um zu prüfen, ob eine strömungstechnische Optimierung des Windungsleger-Rohrhalters notwendig ist, sollen das aerodynamische Verhalten beurteilt und gegebenenfalls Vorschläge für mögliche Verbesserungen erarbeitet werden.

1.1 Position und Aufgabe des Windungslegers

Den Walzgerüsten einer Drahtstraße schließen sich Kühl- und Adjustageeinrichtungen an, die aus folgenden Hauptelementen bestehen:

- Wasserkühlstrecke,
- Windungsleger,
- Luftkühlstrecke,
- Bundsammelstation,
- Preß- und Bindestation.

Ein häufig verwendetes System ist der Drahtauslaß mit Windungskühltransport. (Bild 1)

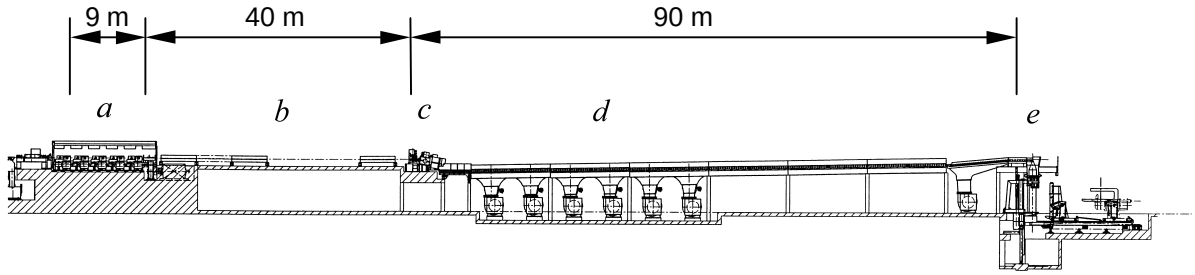


Bild 1: Schnitt durch einen Drahtauslaß mit Windungskühltransport [10]

a) Drahtfertigblock, b) Wasserkühlstrecke, c) Windungsleger, d) Luftkühlstrecke, e) Bundsammelstation.

Der Draht wird, nachdem er das Fertiggerüst verlassen hat, vor dem Windungsleger in der Wasserkühlstrecke vorgekühlt. Die Wasserkühlstrecke kann aus bis zu fünf Kühlkästen bestehen. Mit der Wasserkühlstrecke kann der Draht bis auf Temperaturen von 700°C abgekühlt werden. Innerhalb der Wasserkühlstrecke wird darauf geachtet, daß die Oberflächentemperatur des Drahtes nicht unter 420°C sinkt, da es sonst zur Martensitbildung kommt. Der Temperaturausgleich zwischen Drahtkern und Drahtoberfläche erfolgt wegen der hohen Drahtgeschwindigkeit erst nach dem Windungsleger.

Danach läuft der Draht axial in den Windungsleger ein. Durch ein rotierendes Legerohr wird der Draht in die gewünschten Drahtwindungen gelegt. (Bild 2)

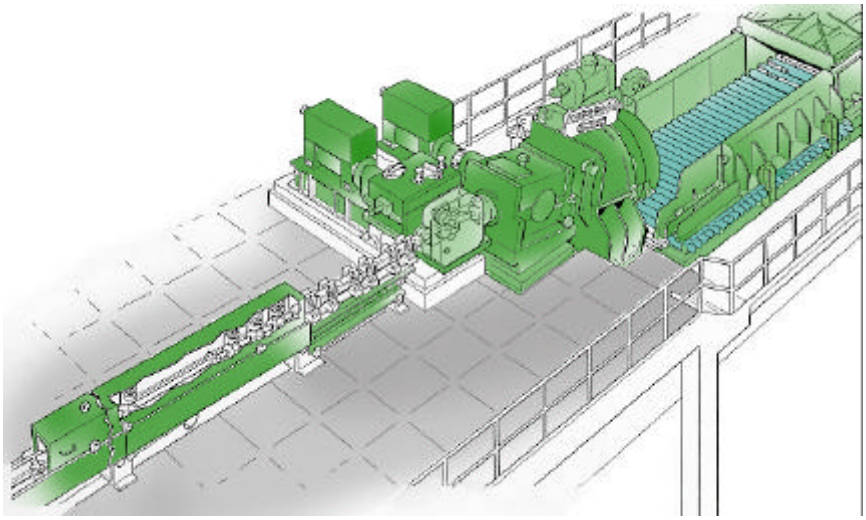


Bild 2: Wasserkühlstrecke, Treiber (Motor), Windungsleger, Transportsystem [10].

Der Windungsleger hat also die Aufgabe, den ungebogenen Draht in eine Form zu bringen, die den Versand bzw. die Lagerung des Drahtes erst ermöglicht. In Bild 3 ist das Drahtwinden durch den Windungsleger dargestellt.

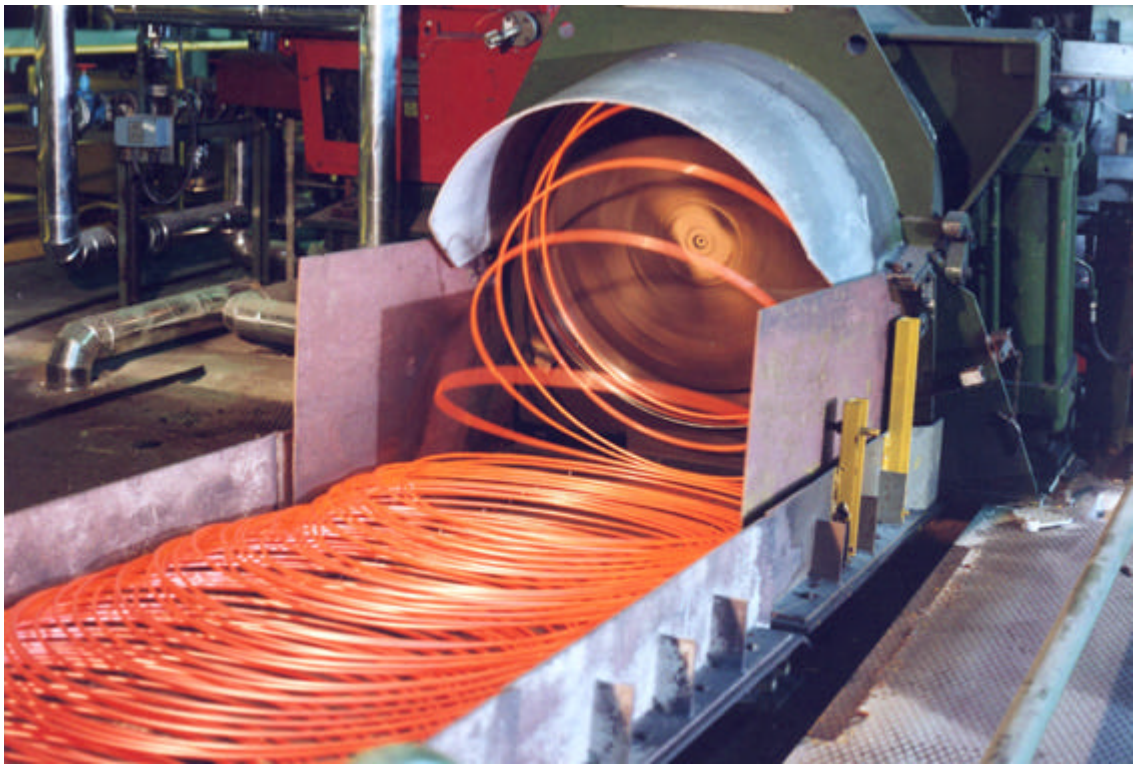


Bild 3: Windungsleger [10].

Hinter dem Windungsleger werden die aufgefächerten Windungen auf einem Rollengang abgelegt und werkstoffabhängig wärmebehandelt. Bei der Wärmebehandlung gibt es drei Möglichkeiten die Abkühlgeschwindigkeit zu beeinflussen. Im einfachen Fall erfolgt die Abkühlung an ruhender Luft ohne den Einsatz von Ventilatoren. Für eine größere Abkühlgeschwindigkeit werden Ventilatoren eingeschaltet, die den Draht mit Luft kühlen, dabei ist der Rollengang nach oben offen. Wenn der Draht langsam (verzögert) abgekühlt werden soll, wird der Rollengang abgedeckt und die Ventilatoren sind aus. In Bild 4 ist der

Rollgang mit geschlossenem Deckel, wie er für die verzögerte Abkühlung eingesetzt wird, dargestellt.

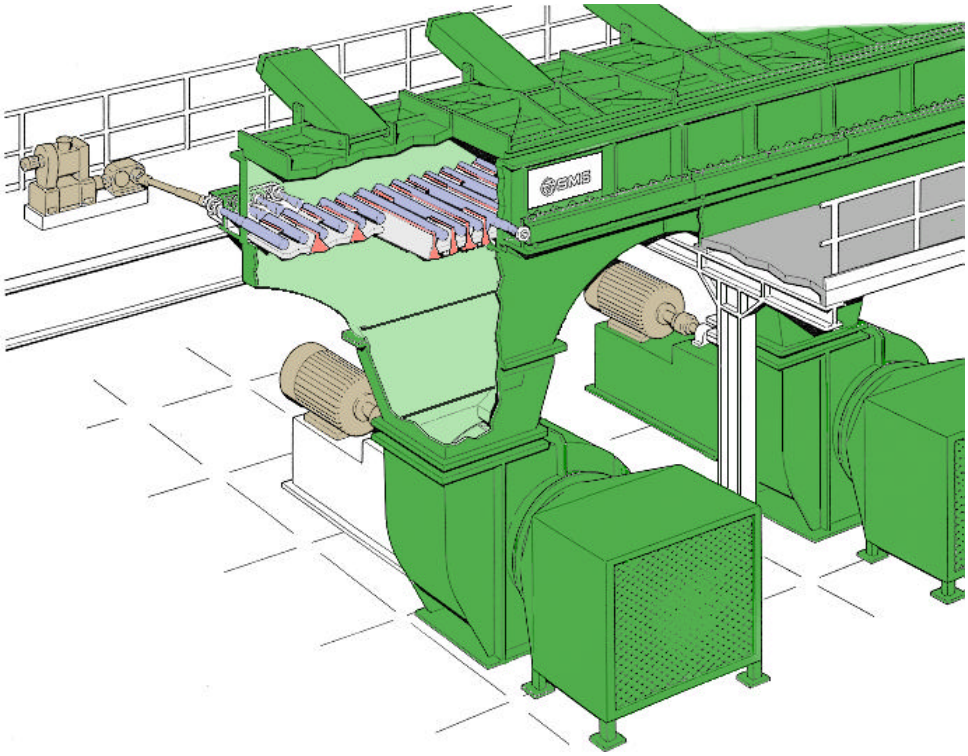


Bild 4: Windungskühltransport in Modul-Bauweise [10].

Schließlich fallen in der Bundbildestation die aufgefächerten Drahtwindungen in die Bundbildekammer und werden zu Bunden gesammelt. (Bild 5)

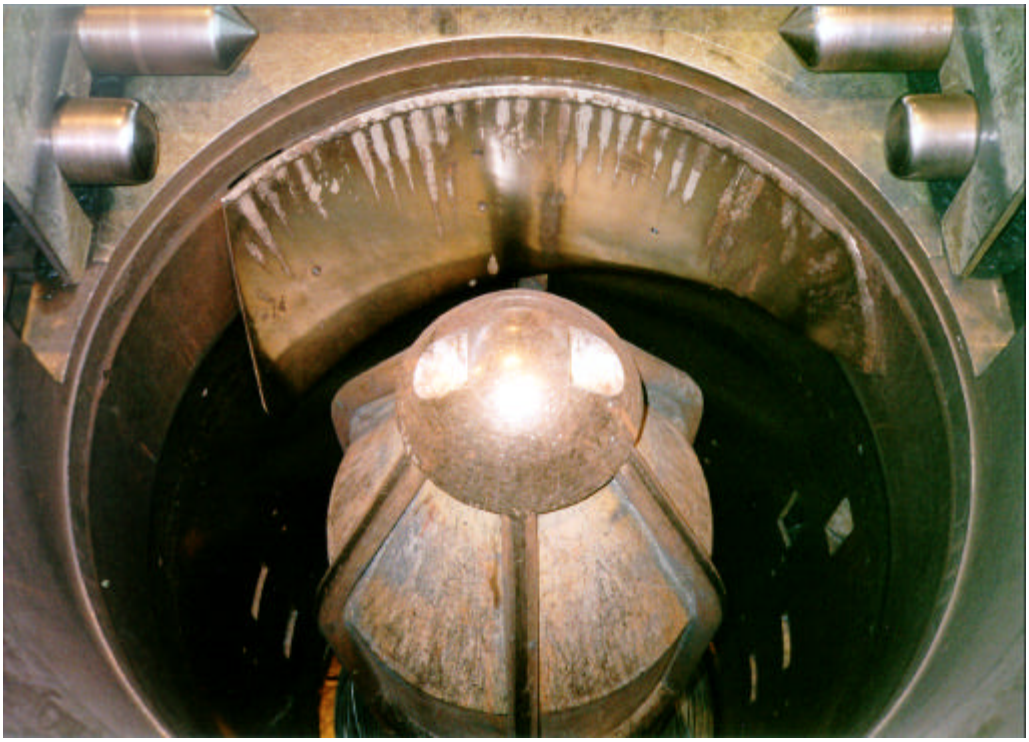


Bild 5: Bundbildestation am Auslauf des Windungskühltransportes [10].

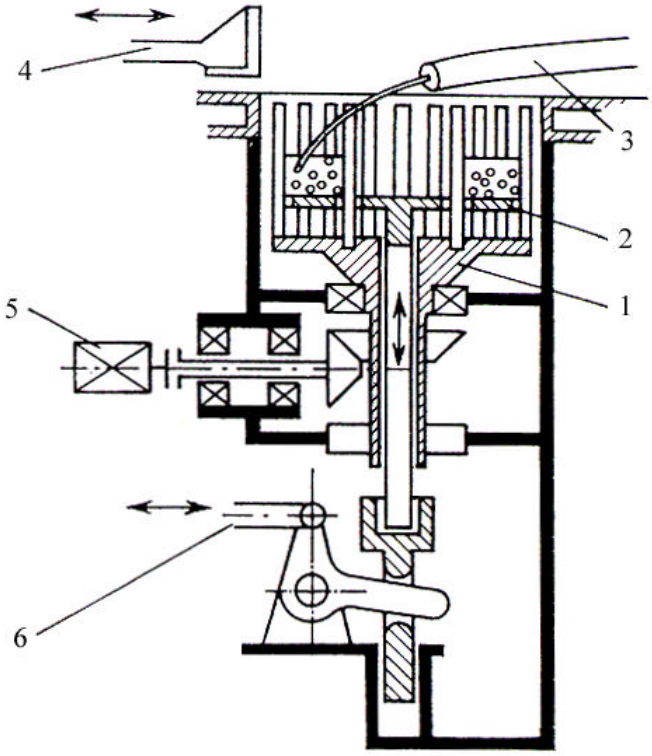
Vor dem Versand bzw. Lagerung werden die Bunde gepreßt und gebunden.

1.2 Historischer Rückblick

Zum Haspeln bzw. Winden von Draht hinter dem letzten Walzgerüst gibt es die Drehrohr- und die Drehkorbhaspeln. Die Drehkorbhaspeln werden im allgemeinen als Garret-Haspeln bezeichnet. Windungsleger und Edenborn-Haspeln gehören zu den Drehrohrhaspeln. An Stelle der Windungsleger wurden früher Edenborn-Haspeln eingesetzt.

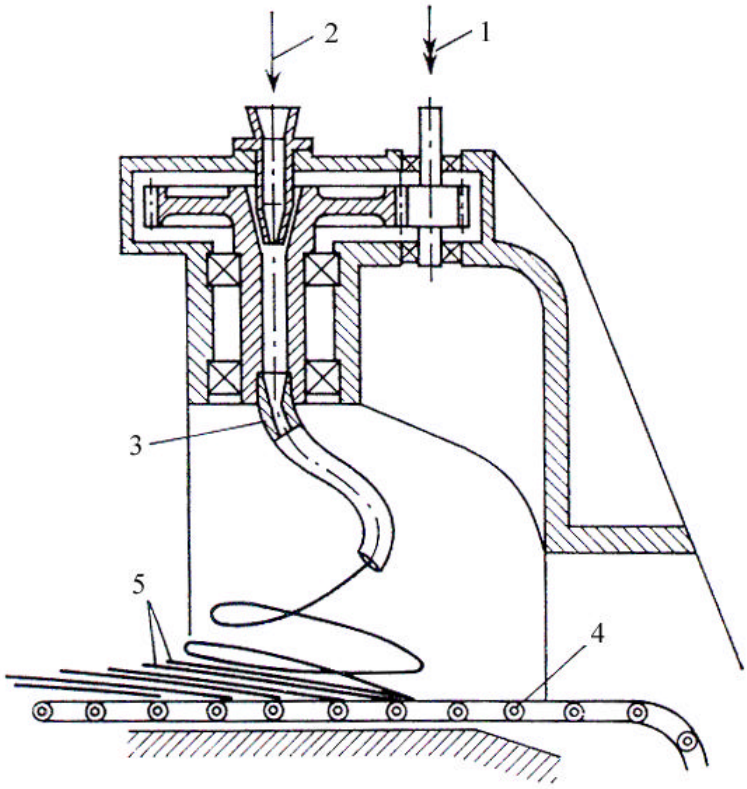
Im Garret-Haspel läuft der Draht tangential auf die rotierende Wickeltrommel auf. Während des Aufwickelns dreht sich der entstehende Ring. Die Schwerpunktachse des entstehenden Drahtringes fällt praktisch nie mit der Drehachse zusammen. Die dadurch bei höhren Umfangsgeschwindigkeiten entstehenden Kräfte und Momente führen zu vorzeitigem Verschleiß der Lager und unzulässiger Belastung der Trommelwelle.

Für hohe Drahtgeschwindigkeiten sind die Garret-Haspeln daher nicht geeignet. Sie werden für dicke Drähte (16 – 60 mm) eingesetzt.



1 rotierender Bundhubteller mit einem inneren und einem äußeren Dornenkranz
2 Bundhubteller
3 Zuführungsrohr für Draht
4 Bundabschieber
5 Haspelantrieb
6 Antrieb für Bundhubteller

Bild 6: Garret-Haspel (nach [5]).



1 Antrieb durch Elektromotor
2 Zuführung des Drahts
3 rotierendes Windungslegerohr
4 Gliedertransportband
5 abgelegte Windungen

Bild 7: Edenborn-Haspel [5].

Im Gegensatz zum Garret-Haspel läuft bei dem Edenborn-Haspel der Draht axial in die vertikal stehende, hohle Trommelwelle ein. Bei dem Edenborn-Haspel dreht sich der Drahtring während des Aufwickelns nicht mit. Der Drahtring führt nur eine Bewegung in vertikaler Richtung aus.

Für höhere Geschwindigkeiten eignen sich Windungsleger, bei denen der Draht axial in ein horizontales Legerohr einläuft. Ein wichtiger Vorteil des Windungslegers besteht darin, daß mit den aufgefächerten Windungen in einem Windungskühltransport der Draht aus einer Hitze kontrolliert wärmebehandelt werden kann.

Als Nachteil der heute üblichen Windungsleger und auch der Edenborn-Haspeln kann angeführt werden, daß diese nur für Rundquerschnitte geeignet sind, da das Walzgut bei jeder Umdrehung des Legerohres um einen Winkel von 360° verdreht wird.

1.3 Aufbau des Windungslegers

Die wichtigsten Komponenten des Windungslegers sind:

- die Hohlwelle mit Antriebsritzel,
- die Dornwelle,
- der Rohrhalter,
- das Legerohr und
- die Auswurfschnecke.

In dem Schnitt des Windungslegers (Bild 8) sind die Benennungen der Maschinenteile für den weitern Verlauf festgelegt.

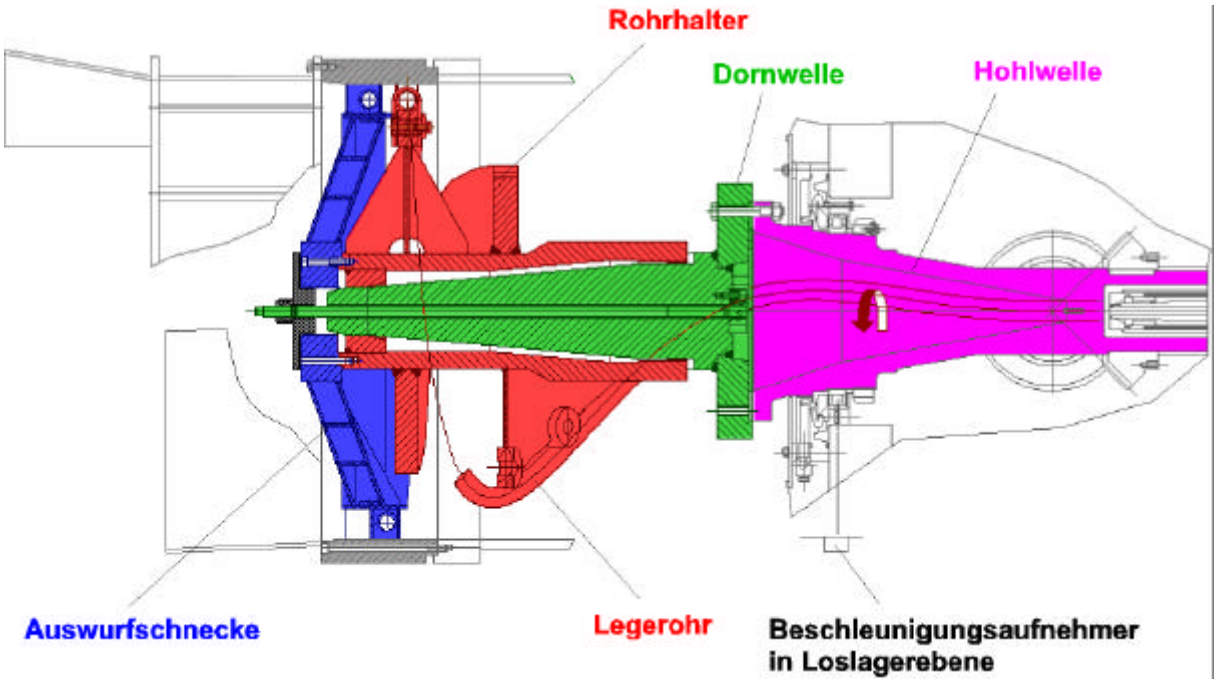
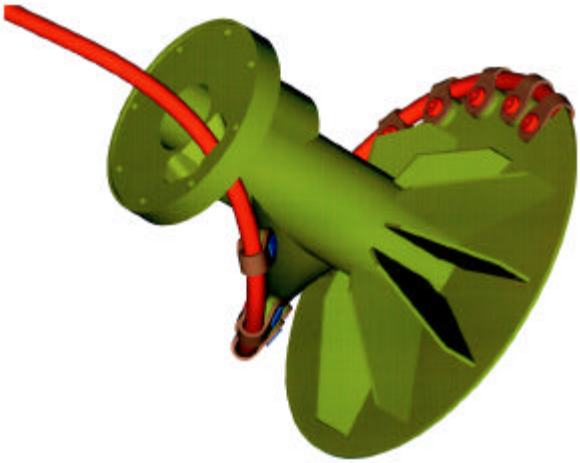


Bild 8: Benennung der Maschinenteile (nach [10]).

1.4 Varianten

Um die Schwingung des Windungslegers und die Wechselzeit des Rohrhalters zu reduzieren, ist der Rohrhalter fortlaufend verbessert worden. Das hat zu momentan vier Varianten geführt. Die Varianten wurden mit Buchstaben benannt (A-D). Bei Anlagen, die neu gebaut werden, kommt nur noch die Variante D zur Anwendung. Die Meßdaten, mit denen später noch Berechnungen durchgeführt werden, wurden an einem Windungsleger der Variante D aufgenommen.

A Die Variante A ist die ursprüngliche Konstruktion. Das Abweisblech, das sich am Auslauf des Rohrhalters befindet, ist duch Rippen abgestützt. Es sind keine Gegengewichte vorhanden, um die Exzentrizität zu vermindern.



B Aus Symmetriegründen wurde eine weitere Legerohrrippe um 180° versetzt angeschweißt. Die Legerohrrippe hat die Form einer Wendel. Auf der zweiten Legerohrrippe ist ein massiver Rundstab, der wie das Legerohr geformt ist, angebracht. Diese Variante hat sich nicht bewährt, da es Festigkeitsprobleme gab.

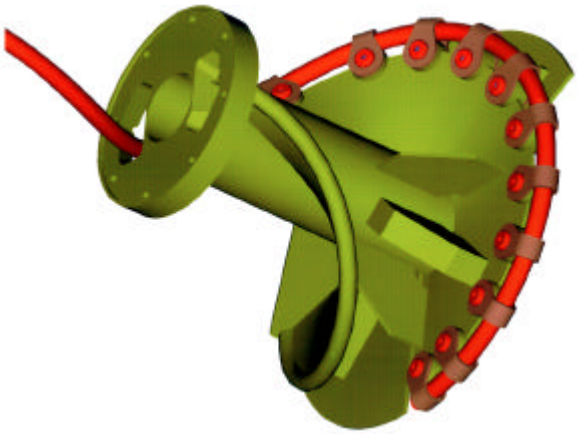
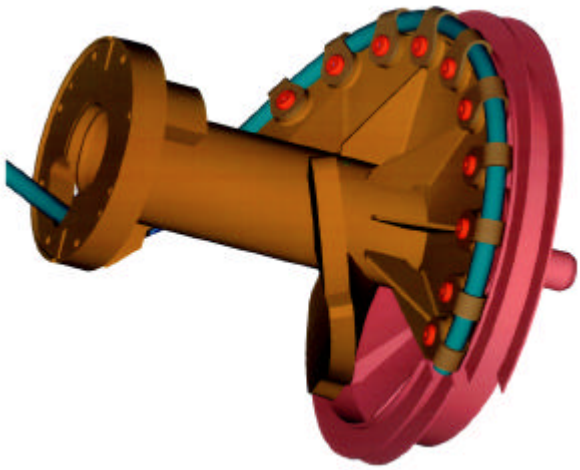


Bild 9: Rohrhaltervarianten (Teil 1) [10].

C Die zweite Legerrohrrippe mit dem Rundstab wurde durch eine massive Rippe ersetzt. Als Ersatz für das Abweisblech wurde eine Auswurfschnecke konstruiert.



D Um die Wechselzeiten des Legerohres zu reduzieren, wurde bei dieser Variante eine Kombination aus Dornwelle und Legerohrhalter entwickelt. Für einen Wechsel des Legerohres wird jetzt das Legerohr einschließlich Legerohrhalter getauscht. Der Sitz des Rohrhalters auf der Dornwelle wurde zunächst zylindrisch ausgeführt. Durch das Spiel in radialer Richtung werden die Schwingungen jedoch verstärkt. In der Folge wurde der Sitz konisch ausgelegt. Eine verstärkte Hohlwelle verringert ebenfalls die Schwingungen. Um die Verbindung zwischen Hohlwelle und Dornwelle zu versteifen, wurden Stiftschrauben mit größerem Nenndurchmesser gewählt.

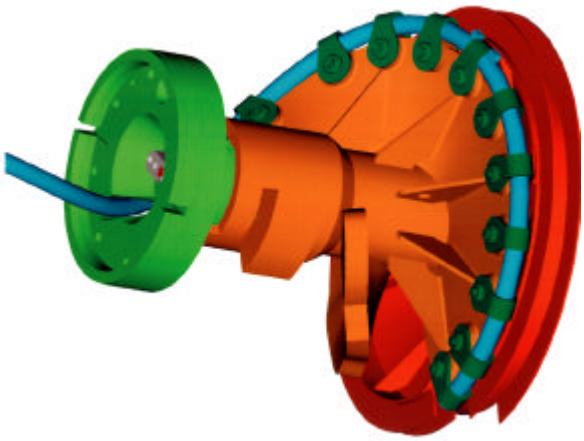


Bild 10: Rohrhaltervarianten (Teil 2) [10].

2. Theoretische Schwingungsanalyse

Die theoretische Schwingungsanalyse für den Windungsleger soll als Parameterstudie mit der Finite Element Methode (FEM) durchgeführt werden. Das Ziel ist, herauszufinden, wie sich die Eigenfrequenz des Windungslegers in Abhängigkeit der Parameter ändert. Man erreicht dies, indem jeder Parameter schrittweise in einem gewählten Intervall untersucht wird.

Mit diesen Ergebnissen kann in Zukunft bei der Konstruktion des Windungslegers eine höhere Eigenfrequenz erzielt werden. Es ist notwendig die Eigenfrequenz zu erhöhen, da diese die maximale Drehzahl des Windungslegers und somit Walzgeschwindigkeit beschränkt.

Für die FEM ist ein geeignetes Modell zu finden. Die Genauigkeit der Ergebnisse würde sehr hoch, wenn man den Windungslegers als möglichst wirklichkeitsgetreues Volumenmodell abbildet.

Ein Volumenmodell kommt aber nicht in Frage, da man die Parameter (z.B. Massen oder Steifigkeiten) nicht gezielt einstellen kann. Um eine dieser Eigenschaften (Parameter) zu ändern, wäre für jeden Intervallschritt ein neues Volumenmodell nötig. Der notwendige Aufwand wäre dabei zu groß.

2.1 Modellierung

Für die Modellierung des Windungslegers werden drei Modellvarianten verglichen. Dies sind das:

1. Modell des Windungslegers als Feder-Masse-System,
2. Balkenmodell ohne Masse,
3. Balkenmodell mit Masse.

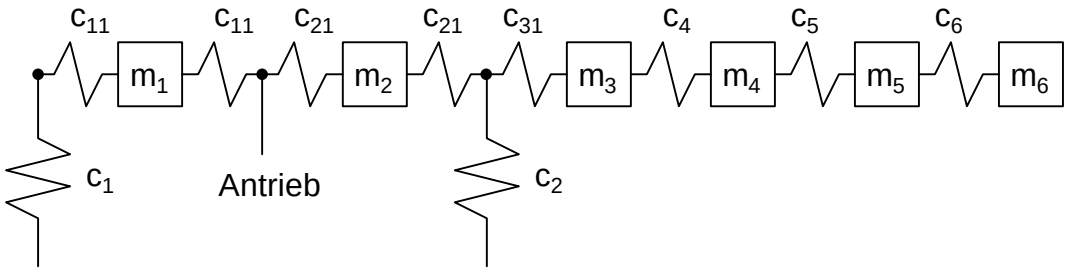


Bild 11: Modell des Windungsleger als Feder-Masse-System.

Bei dem ersten Modell, das betrachtet wurde, handelt es sich um ein Feder-Masse-System. Den Federelementen können Steifigkeiten in allen 6 Freiheitsgraden gegeben werden.

Allen Federn werden Steifigkeiten in horizontaler und vertikaler Richtung gegeben. Zudem wird den Federn c_{11}, c_{21}, c_{31}, c_4, c_5 und c_6 eine Torsionssteifigkeit zugeordnet.

Zuordnung der Steifigkeiten zu den verwendeten Federn:

c_1 Festlager

c_2 Loslager

c_{11} Hälfte der Hohlwelle zwischen Festlager und Antrieb

c_{21} Hälfte der Hohlwelle zwischen Antrieb und Loslager

c_{31} Hälfte des Überhangs der Hohlwelle

c_4 Hälfte des Überhangs der Hohlwelle + Hälfte der Dornwelle

c_5 Hälfte der Dornwelle + Hälfte des Rohrhalters

c_6 Hälfte des Rohrhalters + Auswurfschnecke

Die Massen sind:

m_1 Masse der Hohlwelle zwischen Festlager und Antrieb

m_2 Masse der Hohlwelle zwischen Antrieb und Loslager

m_3 Masse des Überhangs der Hohlwelle

m_4 Masse der Dornwelle

m_5 Masse des Rohrhalters

m_6 Masse der Auswurfschnecke

Der Vorteil besteht darin, daß die Längen (Abstände der Knotenpunkte) nicht berücksichtigt werden müssen.

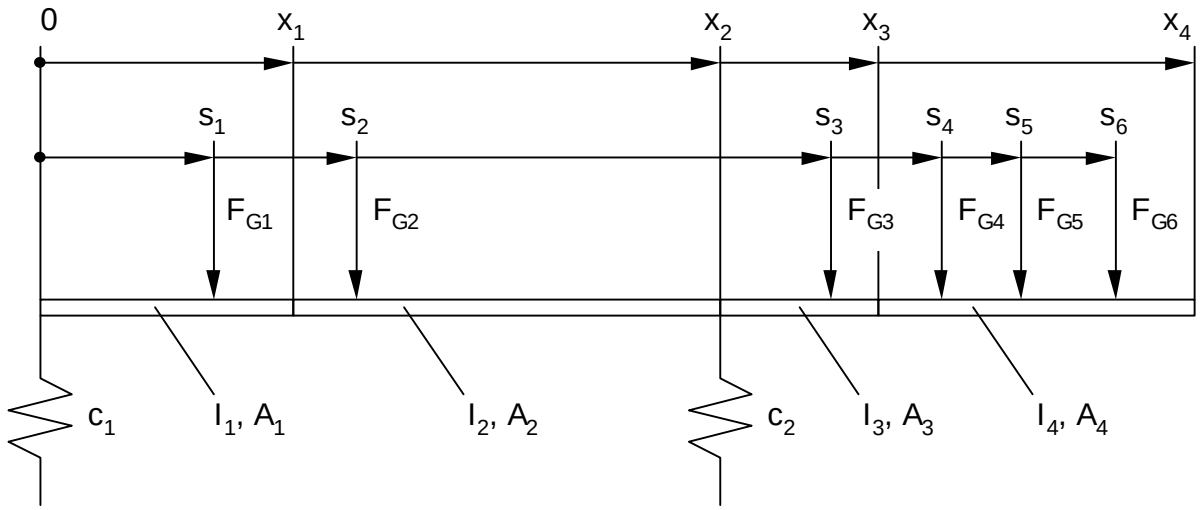


Bild 12: Balkenmodell ohne Masse.

Im nächsten Modell wird ein Balken mit vier Abschnitten, die sich in Fläche und Flächenträgheitsmoment unterscheiden, verwendet. Das Flächenträgheitsmoment in x- und y-Richtung wird gleichgesetzt ($I_{xx} = I_{yy}$). Um die Torsionseigenform zu erhalten, wird das polare Flächenträgheitsmoment mit eingerechnet ($I_p = I_{xx} + I_{yy}$). Es ist zu berücksichtigen, daß Fläche und Flächenträgheitsmoment als Mittelwert des jeweiligen Abschnitts eingesetzt werden.

Die Dichte des Balkens ist null. An den Balken sind sechs diskrete Massen angebracht. Die Massen sind als Gewichtskräfte (F_G) in Bild 12 eingetragen.

Parameter:

x_1 Lage des Antriebs

x_2 Lagerabstand

x_3 Länge der Hohlwelle

x_4 Ende der Auswurfschnecke

F_{G1}, s_1 Gewichtskraft und Schwerpunkt der Hohlwelle zwischen Festlager und Antrieb

F_{G2}, s_2 Gewichtskraft und Schwerpunkt der Hohlwelle zwischen Antrieb und Loslager

F_{G3}, s_3 Gewichtskraft und Schwerpunkt des Überhangs der Hohlwelle

F_{G4}, s_4 Gewichtskraft und Schwerpunkt der Dornwelle

F_{G5}, s_5 Gewichtskraft und Schwerpunkt des Rohrhalters

F_{G6}, s_6 Gewichtskraft und Schwerpunkt der Auswurfschnecke

A_1, I_1 Fläche und Flächenträgheitsmoment der Hohlwelle zwischen Festlager und Antrieb

A_2, I_2 Fläche und Flächenträgheitsmoment der Hohlwelle zwischen Antrieb und Loslager

A_3, I_3 Fläche und Flächenträgheitsmoment des Überhangs der Hohlwelle

A_4, I_4 Fläche und Flächenträgheitsmoment zusammengesetzt aus Dornwelle, Rohrhalter und Auswurfschnecke

Dieses Modell hat den Vorteil, daß man die Schwerpunkte der Massen variieren kann. Die Reduzierung des Eigengewichts von einer Streckenlast zu einer Punktlast verschlechtert das Ergebnis der Eigenfrequenz.

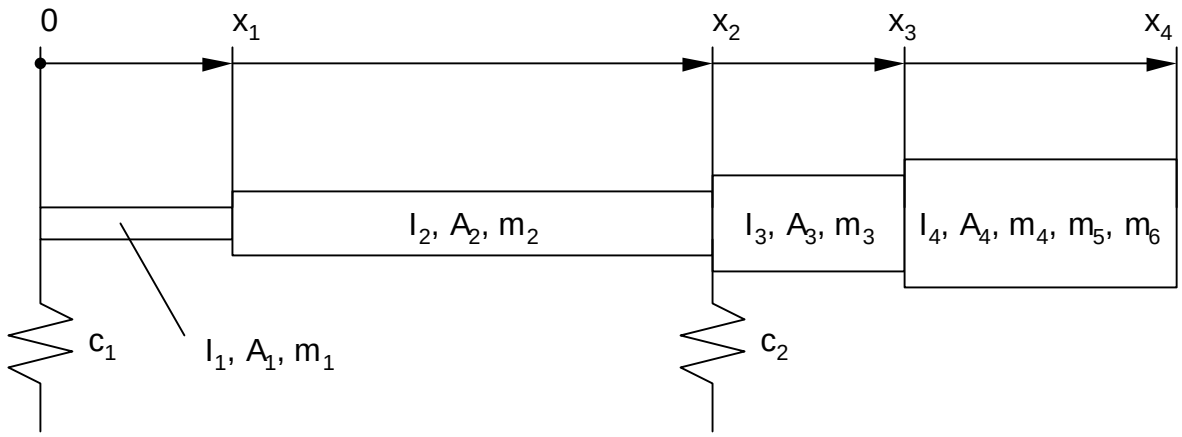


Bild 13: Balkenmodell mit Masse.

Bei dem dritten Modell handelt es wieder um ein Balkenmodell mit vier Abschnitten. Im Gegensatz zu dem vorherigen Modell ist die Dichte des Balkens nicht null.

Da die Massen variiert werden sollen, ist es notwendig, die Dichte der Balkenabschnitte aus der Masse zu berechnen. Dabei entfällt die Möglichkeit den Schwerpunkt der Bauteile anzugeben. Die Dichte läßt sich berechnen mit:

$$r = \frac{m}{A \cdot l}$$ l ist die Länge (z.B.: $x_2 - x_1$) eines Abschnitts.

Bei der Variation von x_1, x_2, x_3 und x_4 wird ein Ausgleich der Massen vorgenommen.

Im vierten Abschnitt sind die Massen der Dornwelle, Rohrhalters und Auswurfschnecke zusammengefaßt.

An den Modellen sind hinsichtlich der Freiheitsgrade die Knotenpunkte einzuschränken. Die freien Endpunkte der Federn sind in allen sechs Freiheitsgraden (x, y, z, φ_x, φ_y, φ_z) festgehalten.

Es ist notwendig, alle Knotenpunkte des Balkens in x-Richtung zu fixieren, da das Ergebnis der Berechnung sonst Eigenformen der Festkörperschwingung liefert.

2.2 Modellauswahl und Parameterintervalle

Aufgrund der Erfahrungen, die bei SMS in der Vergangenheit mit FEM-Modellen gemacht wurden, wurden für das Feder-Masse-System keine Ergebnisse erzeugt. Somit fiel das Feder-Masse-System bei der Auswahl sofort heraus, da die Vereinfachung dieses Modells zu groß ist.

Die beiden Balkenmodelle wurden mit den realen Werten des Windungsleger (Variante D) parametrisiert. Dabei ergaben sich Eigenfrequenzen von

80 Hz bei Balkenmodell ohne Masse und von

59 Hz bei Balkenmodell mit Masse.

Im Januar 1999 wurden von der Firma Vibrations Mät Instrument [12] aus Schweden durch einen Freischwingversuch an Windungslegern der Varianten B, C und D die Resonanzstellen ermittelt. Dabei wurde der Windungsleger mit einem magnetischen Wechselfeld angeregt. Die Frequenz wurde allmählich gesteigert und die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit des Windungslegers aufgezeichnet. Der Peak in diesem Spektrum ist die erste Eigenfrequenz. Für die Variante D ergab sich eine Eigenfrequenz von 42,5 Hz. Zudem wurde festgestellt, daß das Lagerspiel in horizontaler Richtung einen reduzierenden Effekt hat. Die Konstruktion der Variante D, die bei der Firma STFS in Esch/Luxemburg (s. Seite 45) in Betrieb ist, ist seitdem noch etwas geändert worden. Der Unterzug des Windungslegers wurde zur Versteifung mit schrumpfungsfreiem Beton ausgegossen und mit zusätzlichen Fundamentankern, die in dem Bereich unterhalb der Windungslegerachse positioniert sind, an das Fundament angebunden.

Im Dezember 1998 hat die Abteilung VED von SMS, vgl. Bergmann [7], ein Volumenmodell des Windungslegers untersucht. Dieses FEM-Modell war bei weitem nicht so detailiert wie die vorhandenen 3D-CAD Modelle. Die Eigenfrequenzen, die berechnet wurden, waren ebenfalls in horizontaler Richtung mit 38,6 Hz etwas niedriger als in vertikaler Richtung mit 43,9 Hz.

Für die weiteren Parameterstudien wurde das Balkenmodell mit Masse ausgewählt, da der Betrag und das Verhalten von horizontaler und vertikaler Eigenfrequenz näher an der Messung von Vibration Mät Instrument und dem Ergebnis der Untersuchung von SMS lag.

Mit diesem Modell läßt sich zwar nicht die exakte Eigenfrequenz vorhersagen. Aber die Tendenz zu höherer oder niedrigerer Eigenfrequenz bei Änderung eines Parameters ist zu erkennen.

Parameter		**Modellwerte**	**Intervall**		
			Startwert	Endwert	Schritte
I_1	[m^4]	80.00E-6	60.0E-6	100.0E-6	20
I_2	[m^4]	2.80E-3	1.0E-3	5.0E-3	20
I_3	[m^4]	3.20E-3	1.0E-3	5.0E-3	20
I_4	[m^4]	30.00E-3	10.0E-3	50.0E-3	20
x_1	[m]	0.32	0.05	1	20
x_2	[m]	1.1495	0.4	1.3	20
x_3	[m]	1.385	1.2	2.5	20
x_4	[m]	2.652	2.5	4	20
A_1	[m^2]	50.00E-3	5.00E-3	100.00E-3	20
A_2	[m^2]	190.00E-3	50.00E-3	320.00E-3	20
A_3	[m^2]	90.00E-3	10.00E-3	200.00E-3	20
A_4	[m^2]	500.00E-3	100.00E-3	900.00E-3	20
m_1	[kg]	80	10	150	20
m_2	[kg]	300	50	450	20
m_3	[kg]	140	40	240	20
m_4	[kg]	420	100	700	20
m_5	[kg]	650	200	1000	20
m_6	[kg]	280	30	530	20
c_1	[N/m]	1.95E+11	19.49E+9	1.95E+12	20
c_2	[N/m]	4.77E+08	47.68E+6	4.77E+9	20

In der vorstehenden Tabelle sind die Werte aufgeführt, mit denen die Parameterstudie an der Variante D durchgeführt wurde.

2.3 Ergebnis

Die kleinste ermittelte Eigenform ist horizontal. Sie tritt im Modell bei einer Frequenz von 59,3 Hz auf.

Die vertikale Eigenform beträgt im Modell 67,9 Hz. Sie wurde bei der Parameterstudie nie kleiner als die horizontale Eigenform.

Torsionsschwingungen spielen keine Rolle, da die Frequenz dieser Eigenform im Modell 227,4 Hz beträgt.

Im weiteren Verlauf der Ergebnisse ist mit der Eigenfrequenz die erste Eigenform (59,3 Hz) gemeint, da diese von der Drehzahl zuerst angeregt würde.

Die Vergrößerung der Flächenträgheitsmomente (s. Bild 16 – Bild 19) erhöht mit Ausnahme im gemeinsamen Bereich Dornwelle, Rohrhalter und Schnecke (s. Bild 19) die Eigenfrequenz.

Wenn man den Abstand x_1 des Antriebs zum Festlager vergrößert, sinkt die Eigenfrequenz ab (s. Bild 20).

Eine Vergrößerung des Lagerabstandes x_2 hat eine größere Eigenfrequenz zur Folge. Dies ist verständlich, wenn man beachtet, daß die restlichen Parameter gleichbleiben und somit der Überhang verkürzt wird (vgl. Bild 21). Diese Maßnahme läßt sich aber kaum realisieren, da das Wälzlager einen größeren Durchmesser erhalten würde. Es kommt zu dem größeren Durchmesser, weil die Hohlwelle eine Mindestwanddicke behalten muß. Bei steigendem Durchmesser wird die Geschwindigkeit der Wälzkörper größer. Dieser Geschwindigkeit setzt die Festigkeit des Wälzlagers Grenzen.

Man sollte die Länge des Hohlwellenüberhanges reduzieren, um eine höhere Eigenfrequenz zu erhalten (s. Bild 22).

Die Reduzierung der Gesamtlänge (Länge von Dornwelle, Rohrhalter und Auswurfschnecke) wirkt sich ebenfalls positiv auf die Eigenfrequenz aus (s. Bild 23).

Die Querschnittsflächen A_1 (s. Bild 24), A_2 (s. Bild 25) und A_3 (s. Bild 26) haben fast keine Auswirkung auf die Eigenfrequenz. Eine steigende Querschnittschnittsfläche von Dornwelle, Rohrhalter und Auswurfschnecke (s. Bild 27) hat eine höhere Eigenfrequenz zur Folge.

Für die Massen (s. Bild 28 – Bild 33) gilt grundsätzlich, daß deren Zunahme ein Absinken der Eigenfrequenz zur Folge hat. Bei der Masse m_1 (s. Bild 28) fällt das nicht auf, da diese im Vergleich zu den anderen gering ist.

Da das Festlager nicht stark belastet wird, hat die Festlagersteifigkeit c_1 praktisch keinen Einfluß auf die Eigenfrequenz. Diese Aussage wird von dem Ergebnis der Parameterstudie bestätigt (vgl. Bild 34).

Es hat sich gezeigt, daß eine Versteifung des Loslagers vorteilhaft ist (s. Bild 35). Eine Versteifung wäre durch die Erhöhung der Rollenzahl möglich, da zur Zeit ein Wälzlager mit verringerter Rollenanzahl verwendet wird. In der Vergangenheit jedoch wurde das Wälzlager mit verringerter Rollenanzahl gewählt, weil der Verschleiß am baugleichen Lager mit der normalen Rollenanzahl bei den hohen Geschwindigkeiten zu groß war.

Die Vielzahl der Parameterdiagramme (Bild 16 – Bild 35) und deren unterschiedliche Skalierung erschwert die Aussage, welcher Parameter vorrangig geändert werden sollte. Um die Vergleichbarkeit herzustellen, wurden alle Parameter in einem Diagramm (Bild 14) aufgetragen. In dem Diagramm ist die absolute Frequenzänderung zum Modellwert der Eigenfrequenz über die prozentuale Parameteränderung aufgetragen. Nach diesem Diagramm ist der Parameter am günstigsten, dessen Steigung den größten Betrag hat. Hier ist es die Gesamtlänge x_4.

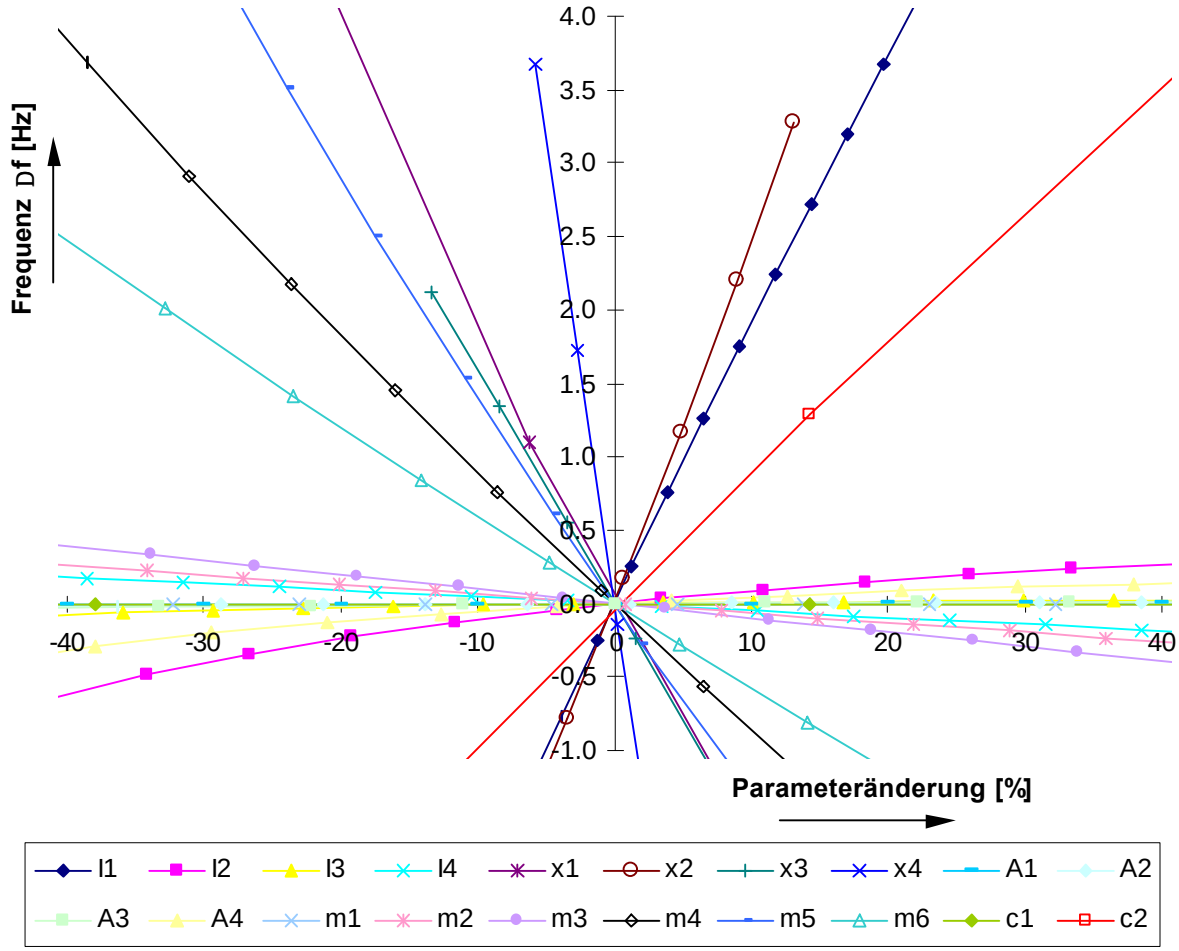


Bild 14: Einfluß der Parameteränderung.

Um eine bessere Übersicht zu erhalten, sind die Parameter in einer Rangliste aufgeführt. In der Rangliste wird die Frequenzänderung bei einer Parameteränderung von einem Prozent aufgeführt.

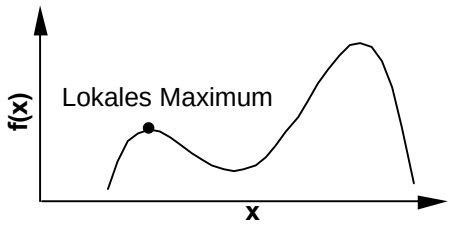
Rang	Parameter	rel. Parameteränderung [%]	Δf [Hz]	abs. Parameteränderung
1	x_4	-1	0.629	-2.65E-02
2	x_1	-1	0.237	-3.20E-03
3	x_2	1	0.237	1.15E-02
4	I_1	1	0.193	8.00E-07
5	x_3	-1	0.159	-1.39E-02
6	m_5	-1	0.140	-6.50E+00
7	m_4	-1	0.087	-4.20E+00
8	m_6	-1	0.060	-2.80E+00
9	c_2	1	0.051	4.77E+06
10	m_3	-1	0.010	-1.40E+00
11	I_2	1	0.008	2.80E-05
12	m_2	-1	0.007	-3.00E+00
13	I_4	-1	0.005	-3.00E-04
14	A_4	1	0.004	5.00E-03
15	I_3	1	0.001	3.20E-05
16	A_3	1	0.000	9.00E-04
17	A_2	1	0.000	1.90E-03
18	A_1	1	0.000	5.00E-04
19	m_1	-1	0.000	-8.00E-01
20	c_1	-1	0.000	-1.95E+09

An dieser Stelle wurde mit der weiteren Automatisierung der Parameterstudie aufgehört. Es soll aber noch eine Perspektive für die Zukunft aufgezeigt werden.

Um das Programm zu verbesseren, sollte der Modellwert des Parameters mit der größten Frequenzänderung (Rang 1) um ein Prozent geändert werden. Dabei muß das Vorzeichen aus der Rangliste berücksichtigt werden. Nun würde der Berechnungszyklus von vorne beginnen. In den Zyklus sollten noch sinnvolle Grenzen für die Parameter eingebaut werden, sonst könnte es vorkommen, daß man ein nicht realisierbares Ergebnis erhält. Solche Ergebnisse würden lauten, daß die Massen null oder die Flächenträgheitsmomente unendlich groß sein müssen.

Wenn sich der Wert der Eigenfrequenz nicht mehr ändert, kann der Zyklus abgebrochen werden. Da das Modell eine starke Vereinfachung darstellt und die Eigenwerte größer ausfallen, sollte anschließend mit den automatisch gefundenen Modellwerten ein Volumenmodell erzeugt und ausgewertet werden, um eine sicherere Aussage über die erreichbare Walzgeschwindigkeit treffen zu können.

Es ist möglich, daß nur eine suboptimale Lösung gefunden wird. Solch eine suboptimale Lösung ist mit einem lokalen Maximum aus der Kurvendiskussion (Analysis) vergleichbar.



In Bild 14 kann man erkennen, daß die Parameter x_4, x_1, x_2, I_1, x_3, m_5, m_4, m_6 und c_2 einen deutlichen Einfluß auf die Eigenfrequenz haben. Da das Ziel dieser Untersuchung die Erhöhung der Eigenfrequenz ist, wurden die Modellwerte dieser Parameter gleichzeitig um 1,0%, 2,5%, 5% und 10% geändert und die dazugehörigen Eigenfrequenzen berechnet.

Um eine Aussage über die nun erreichbaren Walzgeschwindigkeiten treffen zu können, wurde die Auswertung eines früheren Versuches, vgl. Meßbericht (1998) [9], als Bezugsgröße für die Rohrhaltervariante C verwendet. Damals mußte der Windungsleger wegen der zu großen Schwingung bei einer Drehzahl von 2036 min^{-1} abgeschaltet werden. Dies entspricht einer Walzgeschwindigkeit von 110 m/s. Für die Rohrhaltervariante D wurde die maximale Walzgeschwindigkeit mit 105 m/s angegeben. Um die Brauchbarkeit der Ergebnisse zu kontrollieren, wird zusätzlich die maximale Walzgeschwindigkeit mit der experimentell ermittelten Eigenfrequenz ins Verhältnis gesetzt. Nun kann man die Faktoren x berechnen:

Real: $$x_1 = \frac{v_{w,max}}{f_{gem} \cdot D \cdot p} \text{ und}$$

Modell: $$x_2 = \frac{v_{w,max}}{f_{rech} \cdot D \cdot p} .$$

Variante	C	D
f_{rech} [Hz]	64,67	59,34
f_{gem} [Hz]	45	42,5
$v_{w,max}$ [m/s]	110	105
x_1	0,720	0,728
x_2	0,501	0,522

Die geringfügige Diffenz zwischen x_2(C) und x_2(D) läßt den Schluß zu, daß das verwendete FEM-Modell für die Abschätzung der zu erreichenden Walzgeschwindigkeit geeignet ist. Die kleinere Differenz zwischen x_1(C) und x_1(D) kann man darauf zurückführen, daß es sich um gemessene Eigenfrequenzen handelt.

Die Notwendigkeit eines solchen Faktors kann man anhand von Bild 15 erkennen. Wenn die Drehfrequenz des Windungslegers (z.B. x_2 = 0,522) genauso groß wie die Eigenfrequenz würde, befände man sich an der Resonanzstelle. Dies würde unweigerlich zur Zerstörung der Maschine führen. Der Faktor ist nur für das gewählte FEM-Modell gültig.

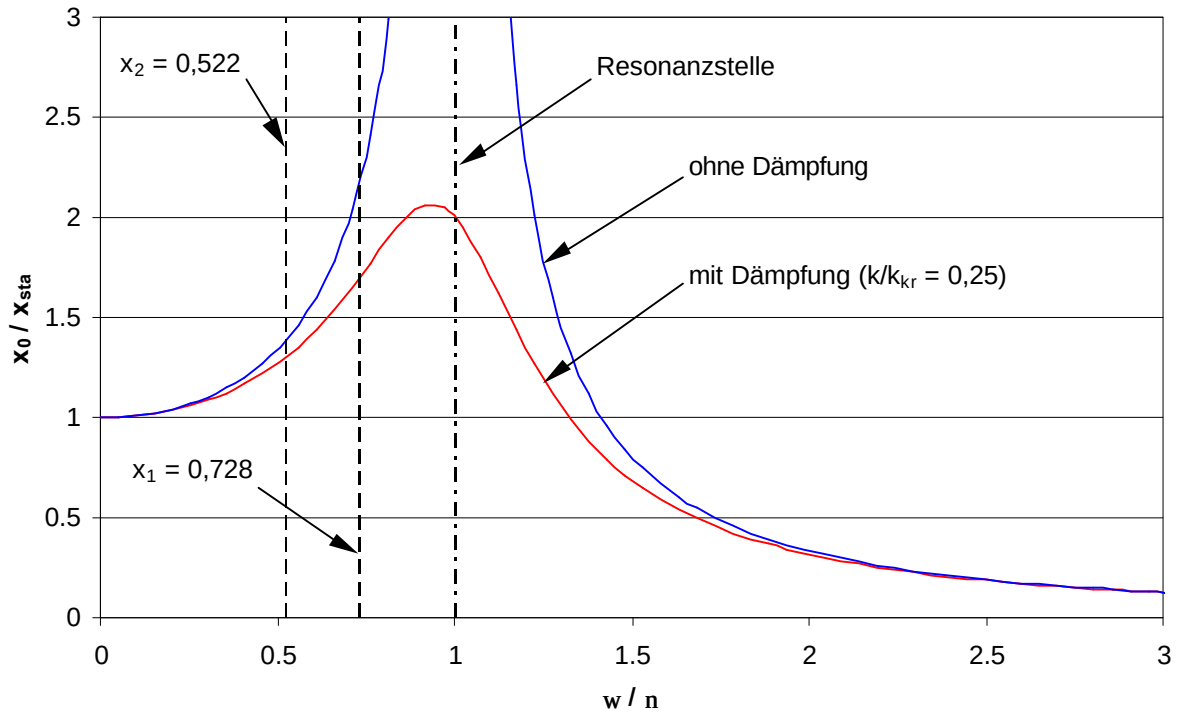


Bild 15: Vergrößerungsfunktion.

An die theoretisch erreichbare Walzgeschwindigkeit v_w gelangt man mit:

$$v_w = f \cdot x_2 \cdot D \cdot p \quad .$$

rel. Parameteränderung [%]	Eigenfrequenz f [Hz]	Walzgeschwindigkeit v_w [m/s]
0	59,34	105
2,5	63,39	112
5	67,74	120
10	81,10	144

Bei einigen Parametern scheint es schwierig zu werden, sie um 10% zu änden, um die angestrebten 140 m/s Walzgeschwindigkeit zu erreichen. Ob die Änderung möglich ist, muß die zuständige Konstruktionsabteilung klären.

Um festzustellen, ob eine Superposition (Überlagerung) einzelner Parameter möglich ist, wurden drei Parameterpaare exemplarisch untersucht. Das Auswahlkriterium für die Parameterpaare (x_1 ; x_3) und (x_2 ; I_1) war die große Steigung in Bild 14. Bei dem dritten Paar (I_4 ; m_4), sollten zwei Parameter kombiniert werden, die etwas miteinander zu tun haben, also zum gleichen Abschnitt gehören.

Superposition				**Modell**		
Einzel-parameter	**rel. Änderung**	**Df_{Einzel} [Hz]**	**S Df_{Einzel} [Hz]**	**Parameter-kombination**	**rel. Änderung**	**$Df_{Kombination}$ [Hz]**
I_4	– 5%	0,0233	0,4643	I_4 & m_4	– 5%	0,4645
m_4	– 5%	0,4410				
x_1	– 5%	0,8878	1,8828	x_1 & x_3	– 5%	1,8965
x_3	– 5%	0,9950				
x_2	+ 5%	0,9984	1,9553	x_2 & I_1	+ 5%	1,9357
I_1	+ 5%	0,9569				

Es sind Abweichungen zwischen der kombinierten Frequenzänderung von der Summe der Einzelfrequenzänderungen erkennbar. Die Abweichungen sind zwar gering, aber es ist nicht sichergestellt, daß die Abweichungen bei anderen Kombinationen ebenfalls klein bleiben. Die Auswirkung der Kombination von I_4 und m_4 sowie x_1 und x_3 ist größer als die der Einzelparameter. Bei der Kombination von x_2 und I_1 fällt die Erhöhung der Eigenfrequenz geringer aus als bei der Summe der Einzelparameter.

Die Superposition scheint in erster Näherung brauchbare Ergebnisse zu liefern.

Um die Loslagersteifigkeit c_2 zu erhöhen, wurde inzwischen von der Firma FAG ein neues Lager entworfen. Dieses Lager hat eine um etwa 40% höhere radiale Steifigkeit. Diese Änderung führt nach Bild 14 zu einer Erhöhung der Eigenfrequenz um $\Delta f = 3{,}5$ Hz auf 62,8 Hz. Hierdurch wäre eine Walzgeschwindigkeit (mit $x_2 = 0{,}522$) von $v_w = 111$ m/s erreichbar.

Im folgenden werden die Parameter und deren Einfluß auf die Eigenformen des Modells für den Typ D dargestellt.

Dargestellt sind die:

1. Eigenform: horizontal,
2. Eigenform: vertikal und
3. Eigenform: torsional.

I_1	Bild 16	Flächenträgheitsmoment der Hohlwelle zwischen Festlager und Antrieb.
I_2	Bild 17	Flächenträgheitsmoment der Hohlwelle zwischen Antrieb und Loslager.
I_3	Bild 18	Flächenträgheitsmoment des Überhangs der Hohlwelle.
I_4	Bild 19	Flächenträgheitsmoment von Dornwelle, Rohrhalter und Auswurfschnecke.
x_1	Bild 20	Abstand des Antriebs vom Festlager.
x_2	Bild 21	Lagerabstand.
x_3	Bild 22	Länge der Hohlwelle.
x_4	Bild 23	Gesamtlänge.
A_1	Bild 24	Fläche der Hohlwelle zwischen Festlager und Antrieb.
A_2	Bild 25	Fläche der Hohlwelle zwischen Antrieb und Loslager.
A_3	Bild 26	Fläche des Überhanges der Hohlwelle.
A_4	Bild 27	Fläche von Dornwelle, Rohrhalter und Auswurdschnecke.
m_1	Bild 28	Masse der Hohlwelle zwischen Festlager und Antrieb.
m_2	Bild 29	Masse der Hohlwelle zwischen Antrieb und Loslager.
m_3	Bild 30	Masse des Überhanges der Hohlwelle.
m_4	Bild 31	Masse der Dornwelle.
m_5	Bild 32	Masse des Rohrhalters.
m_6	Bild 33	Masse der Auswurfschnecke.
c_1	Bild 34	Festlagersteifigkeit.
c_2	Bild 35	Loslagersteifigkeit.

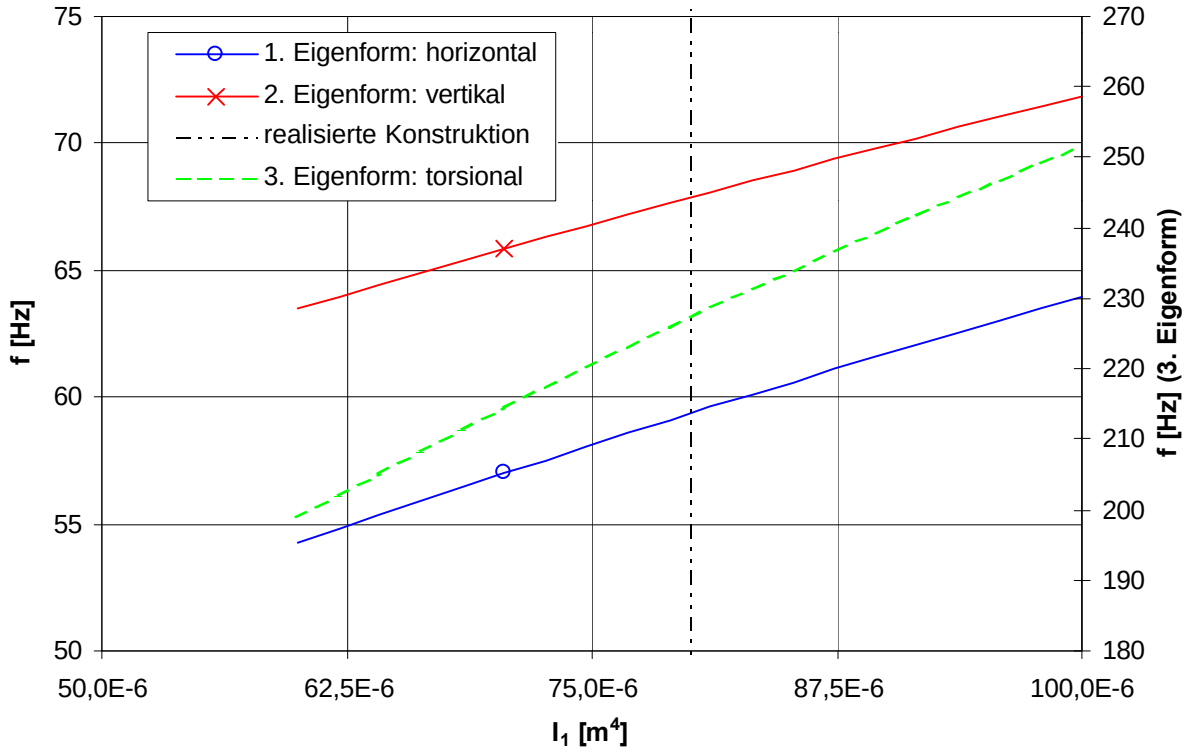


Bild 16: Flächenträgheitsmoment der Hohlwelle zwischen Festlager und Antrieb.

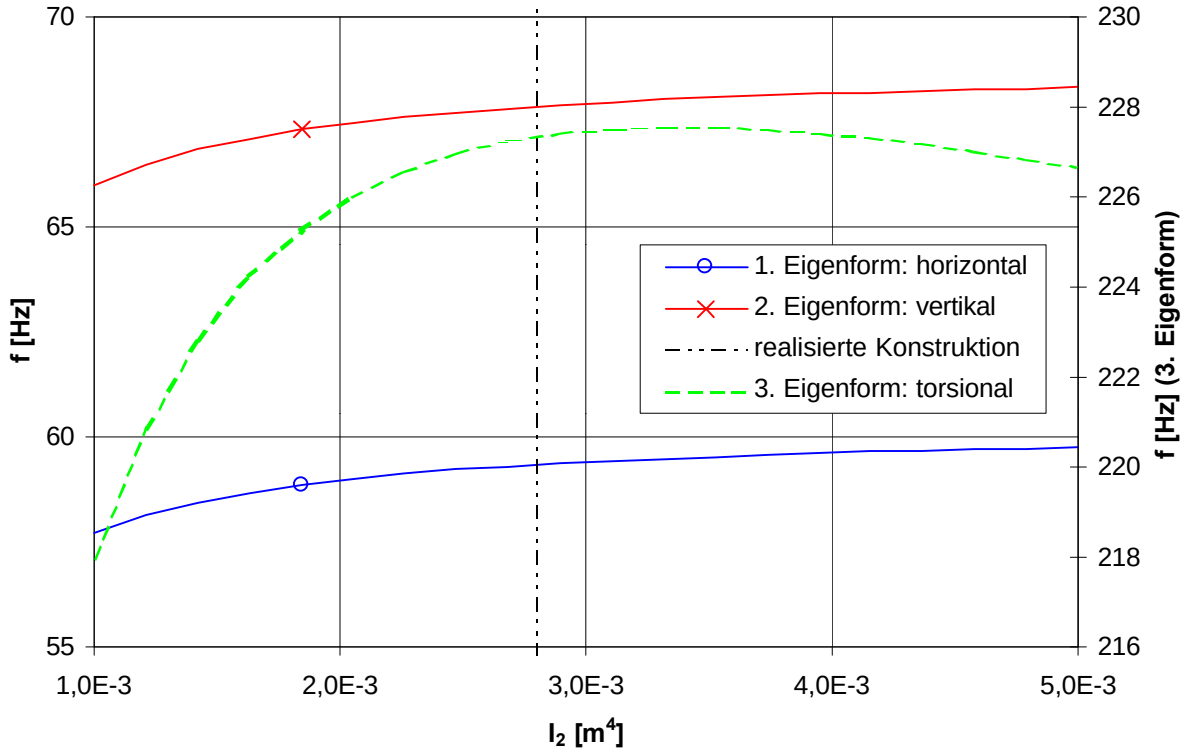


Bild 17: Flächenträgheitsmoment der Hohlwelle zwischen Antrieb und Loslager.

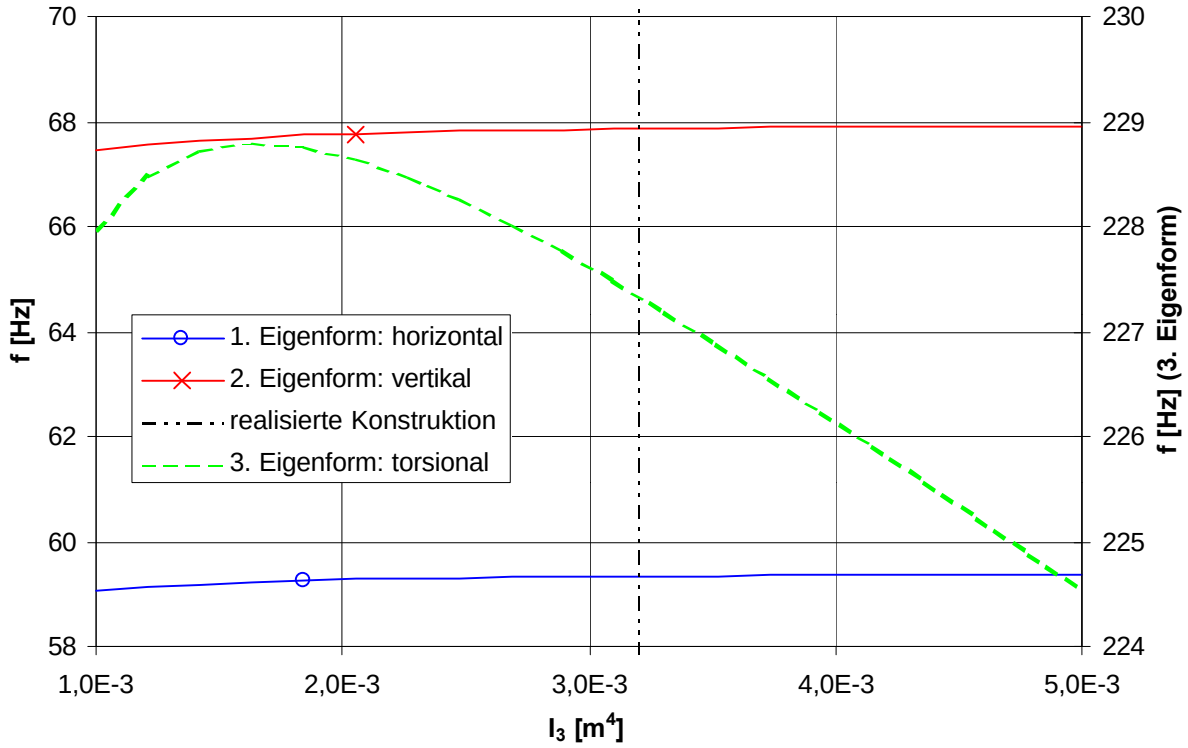


Bild 18: Flächenträgheitsmoment des Überhangs der Hohlwelle.

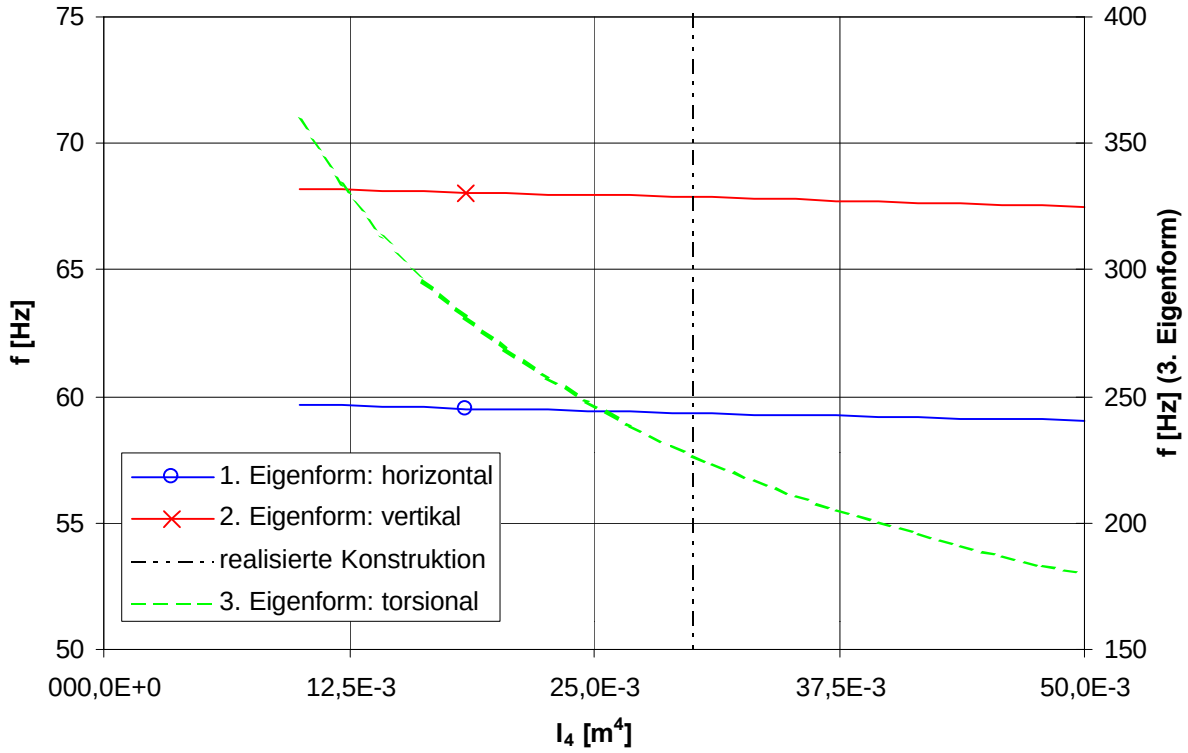


Bild 19: Flächenträgheitsmoment von Dornwelle, Rohrhalter und Auswurfschnecke.

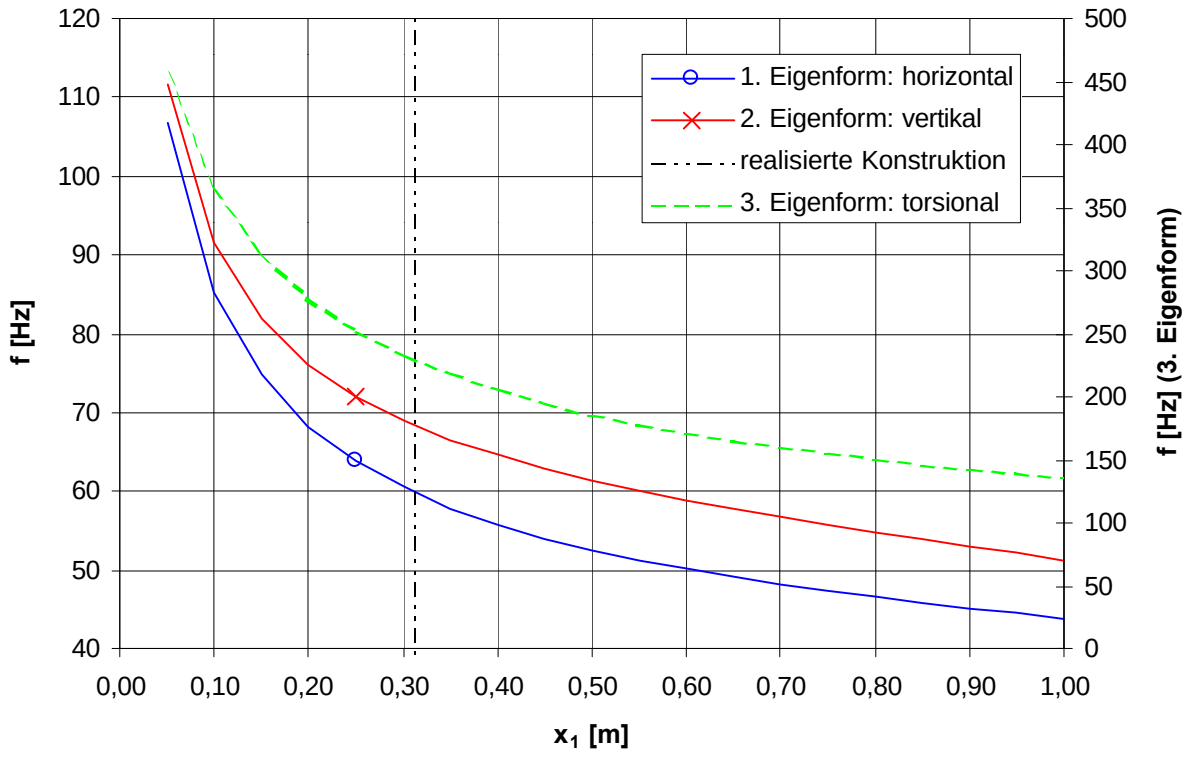


Bild 20: Abstand des Antriebs vom Festlager.

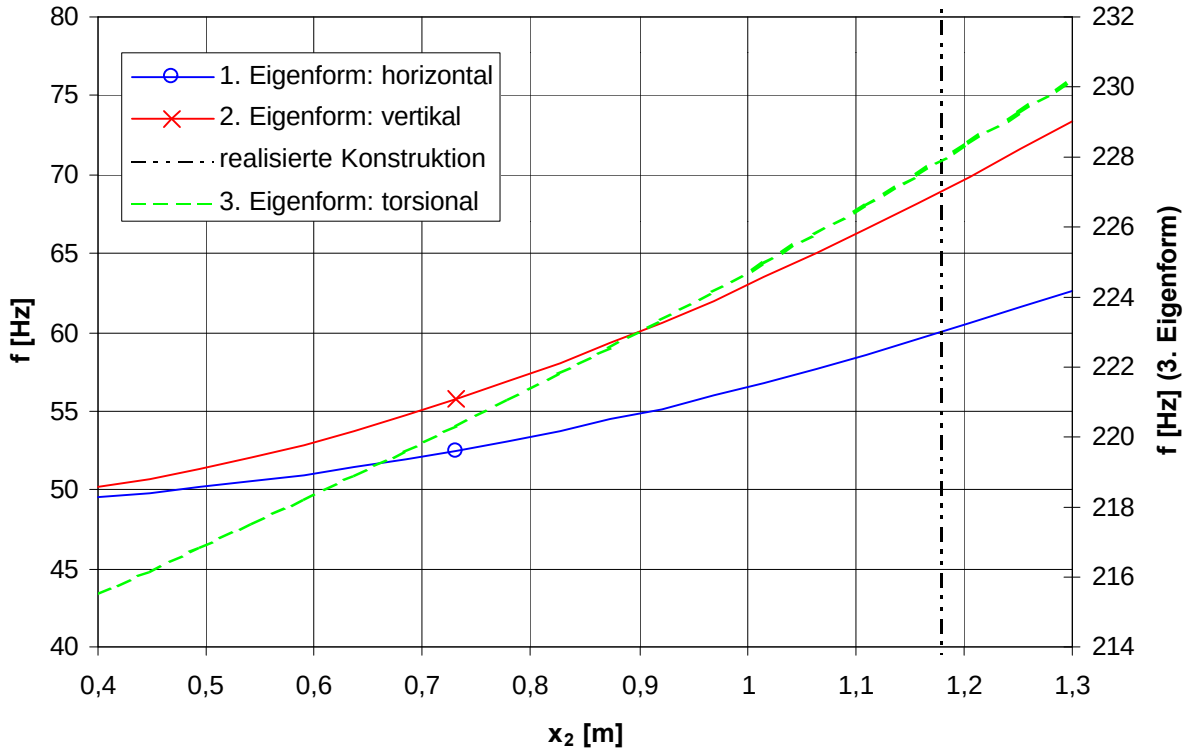


Bild 21: Lagerabstand.

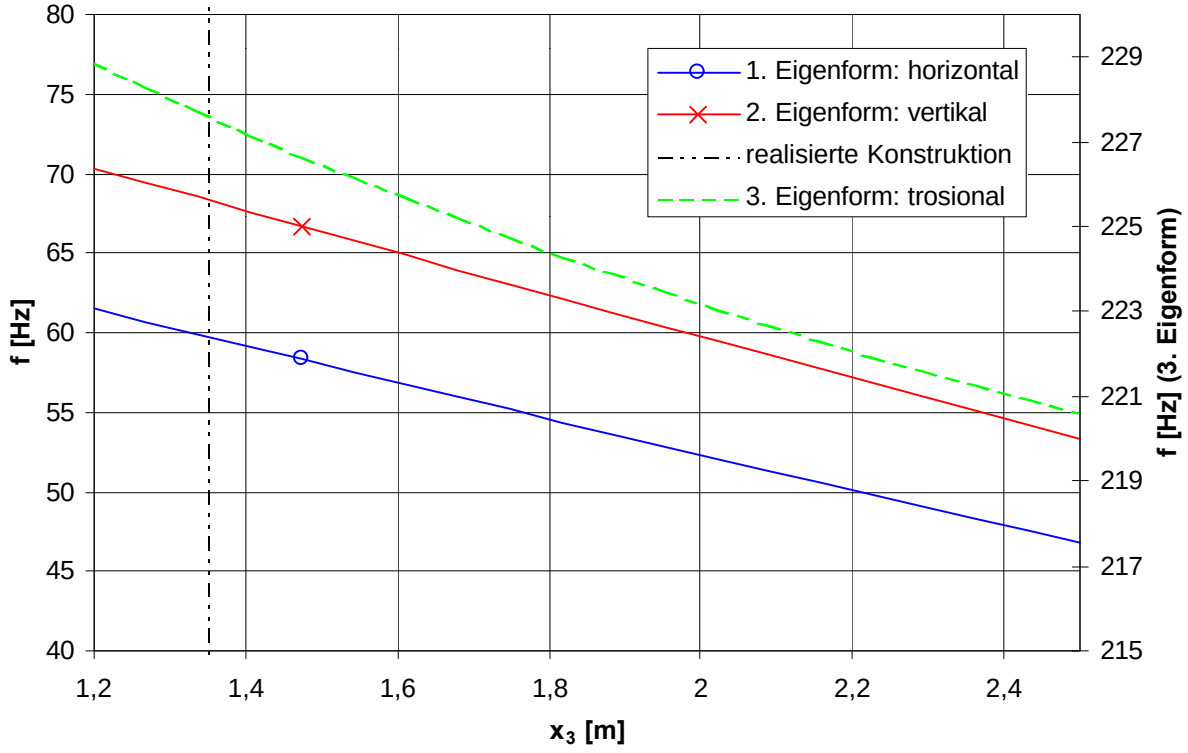


Bild 22: Länge der Hohlwelle.

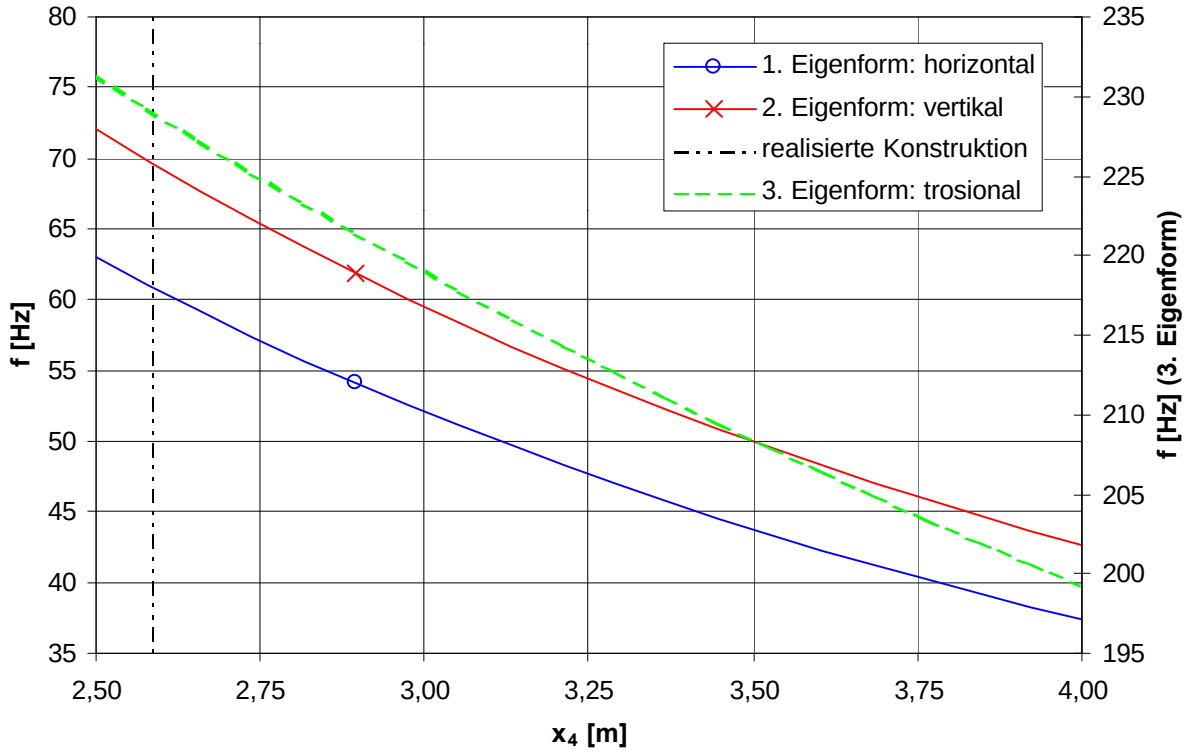


Bild 23: Gesamtlänge.

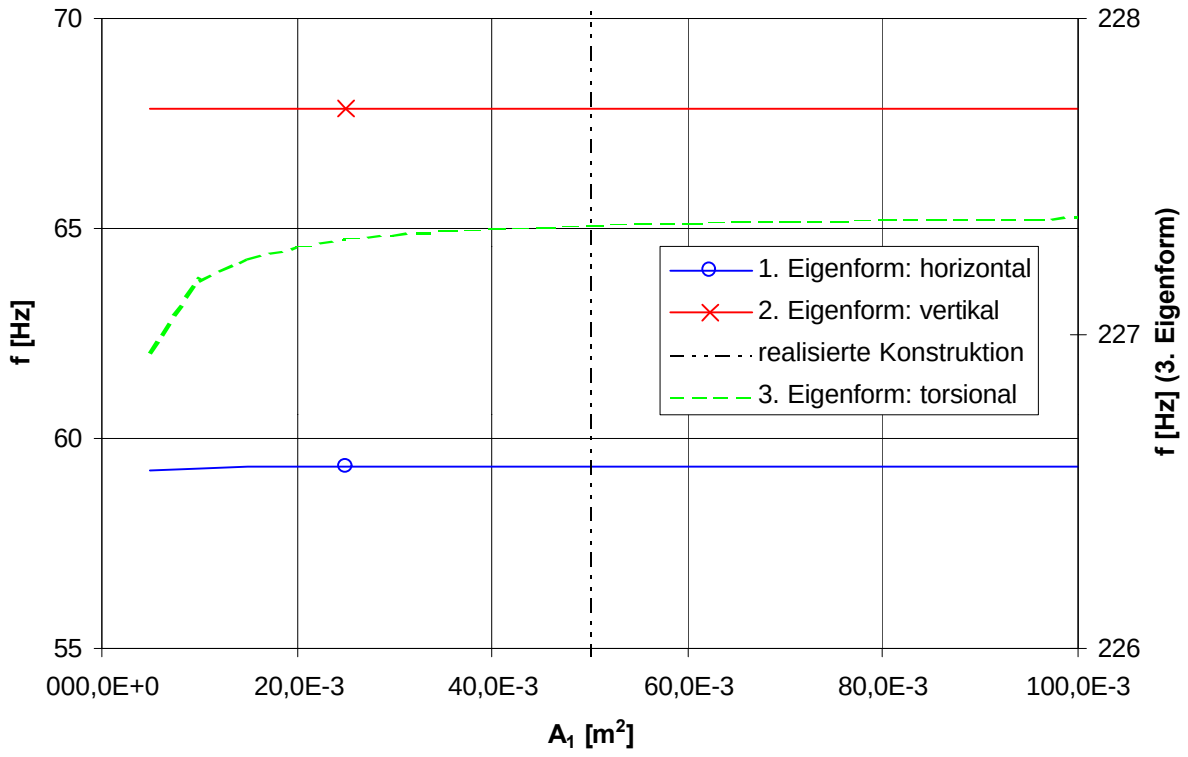


Bild 24: Fläche der Hohlwelle zwischen Festlager und Antrieb.

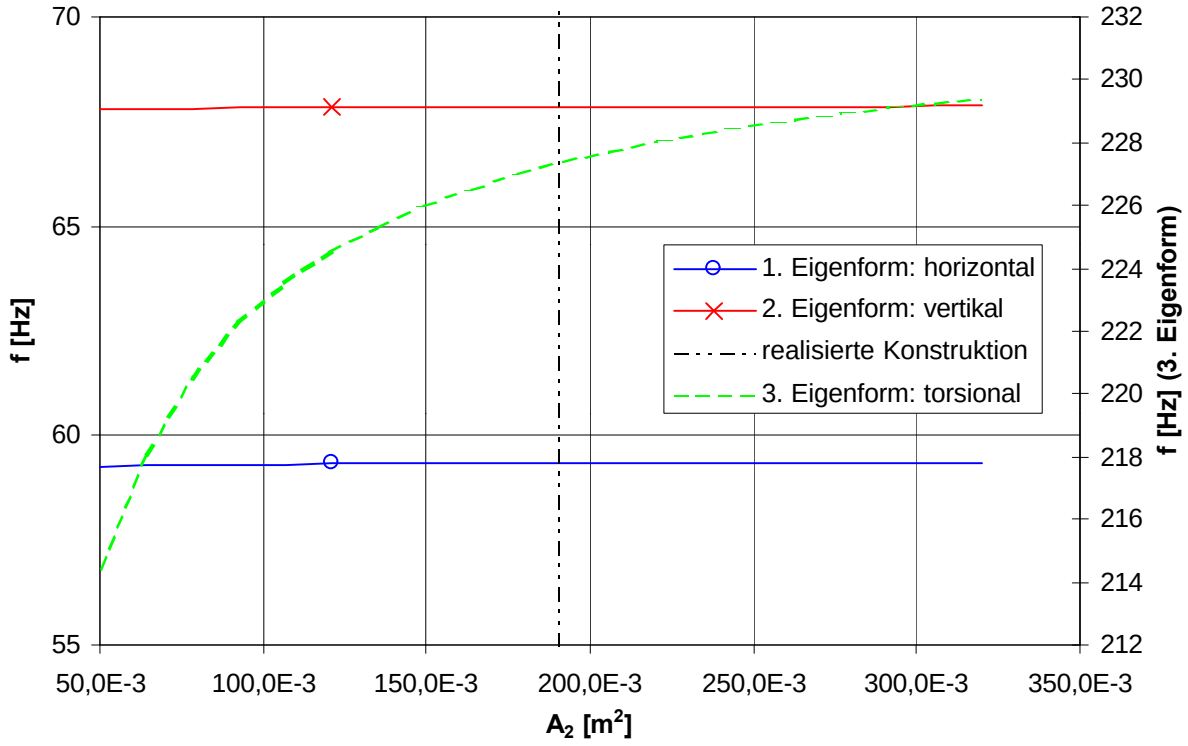


Bild 25. Fläche der Hohlwelle zwischen Antrieb und Loslager.

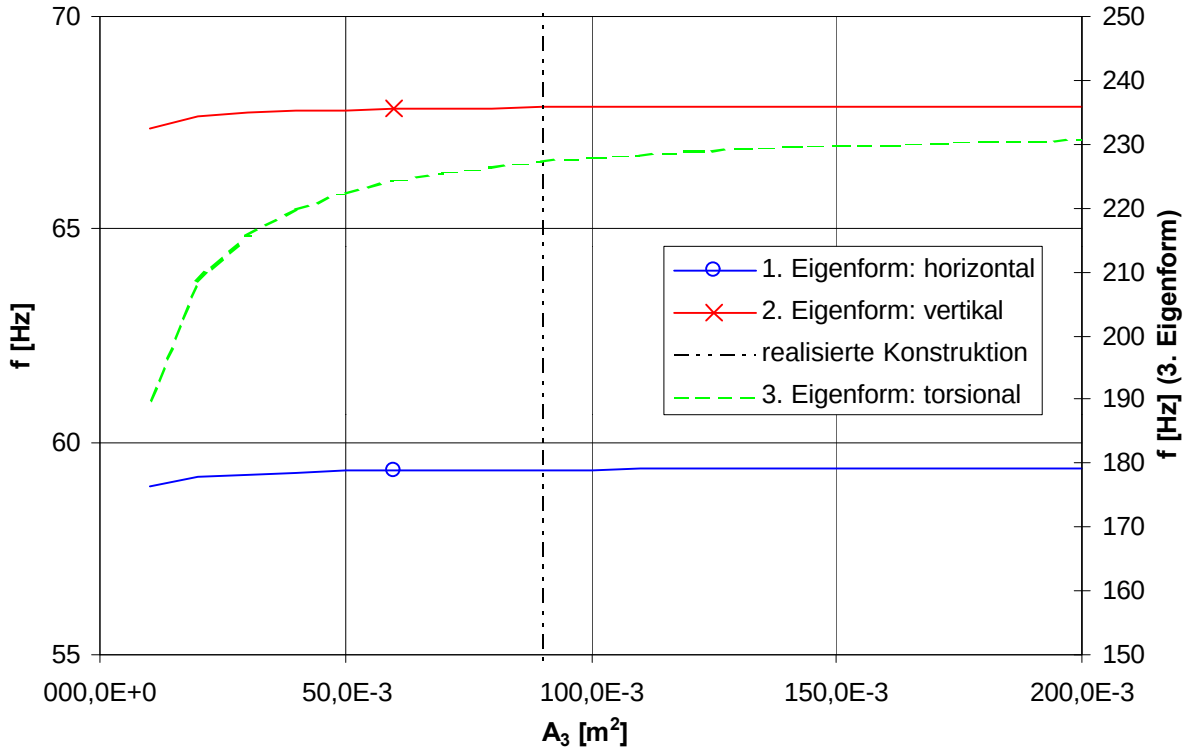


Bild 26: Fläche des Überhanges der Hohlwelle.

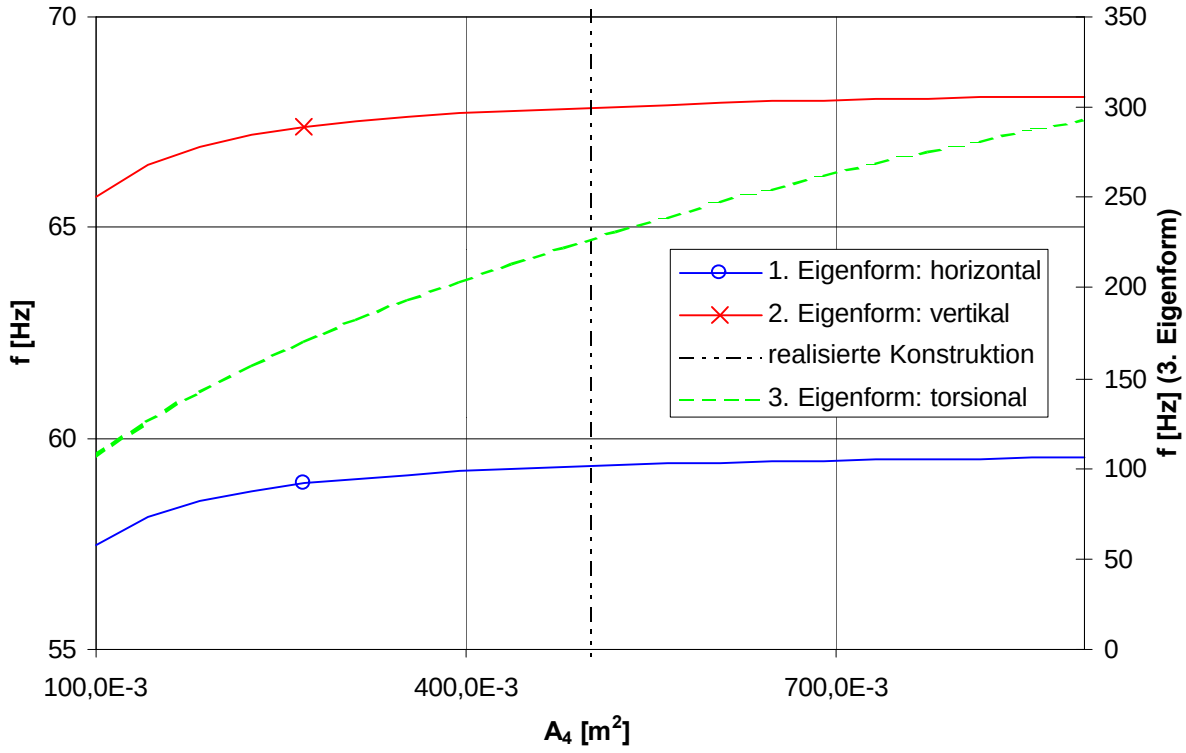


Bild 27: Fläche von Dornwelle, Rohrhalter und Auswurdschnecke.

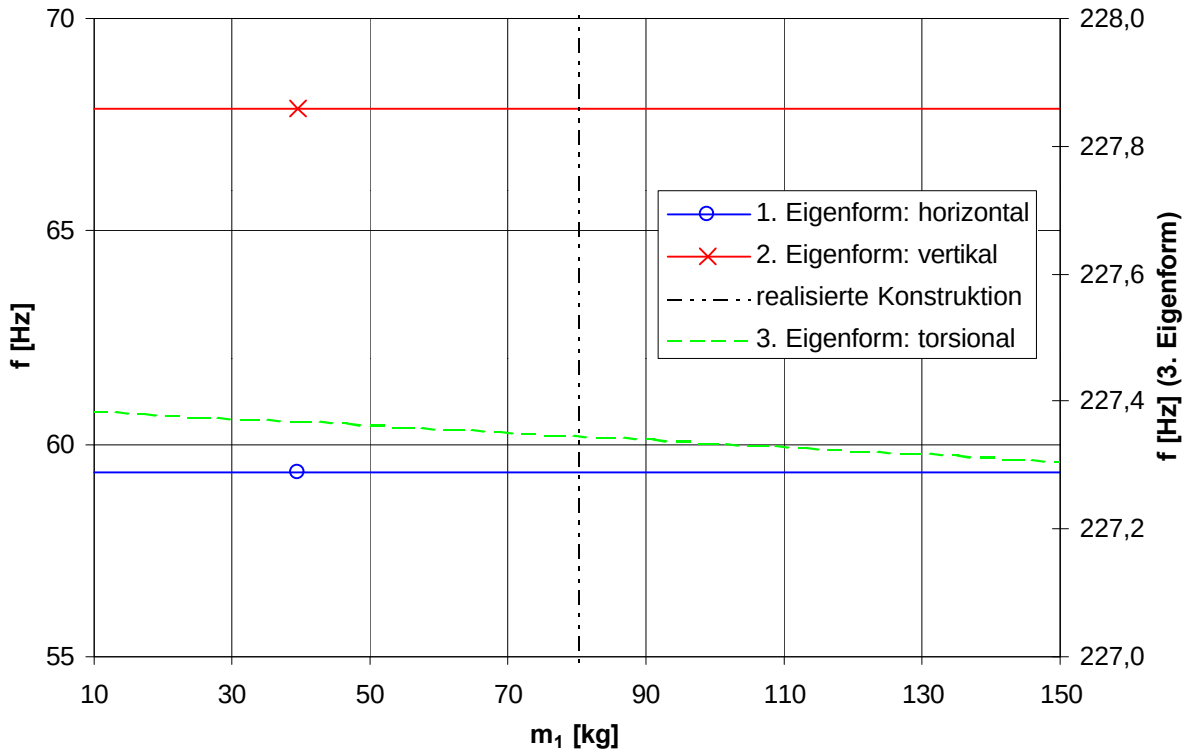


Bild 28: Masse der Hohlwelle zwischen Festlager und Antrieb.

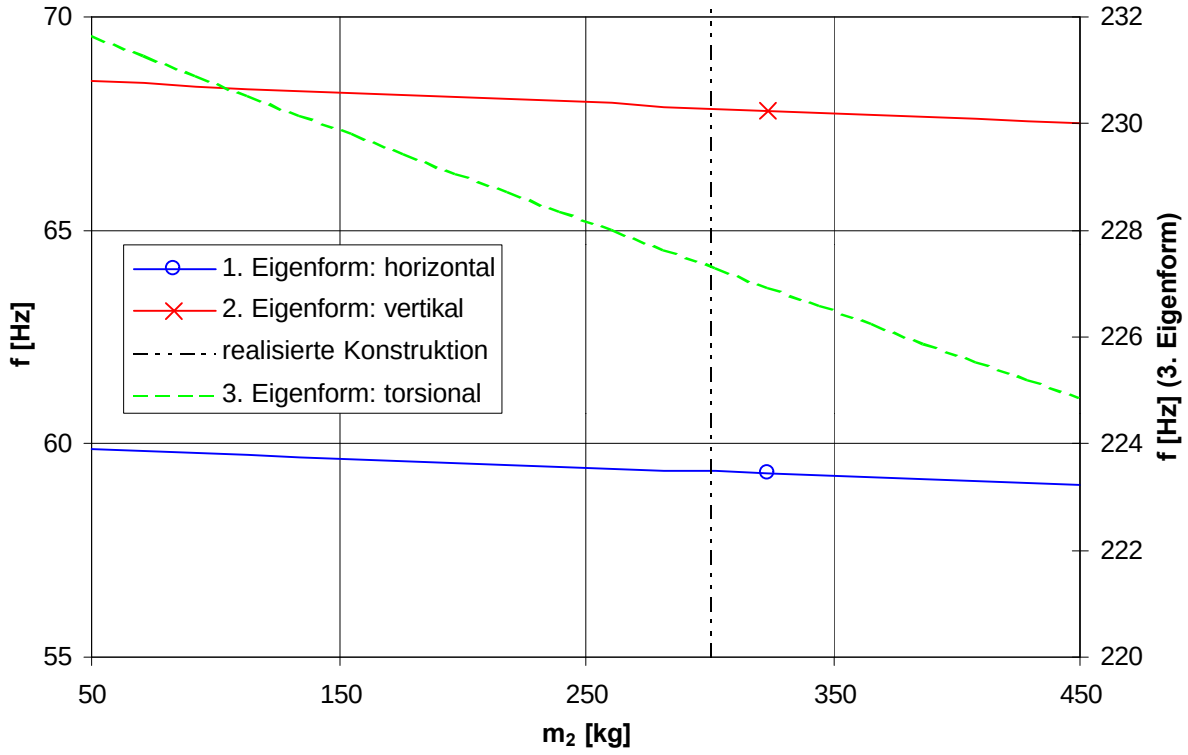


Bild 29: Masse der Hohlwelle zwischen Antrieb und Loslager.

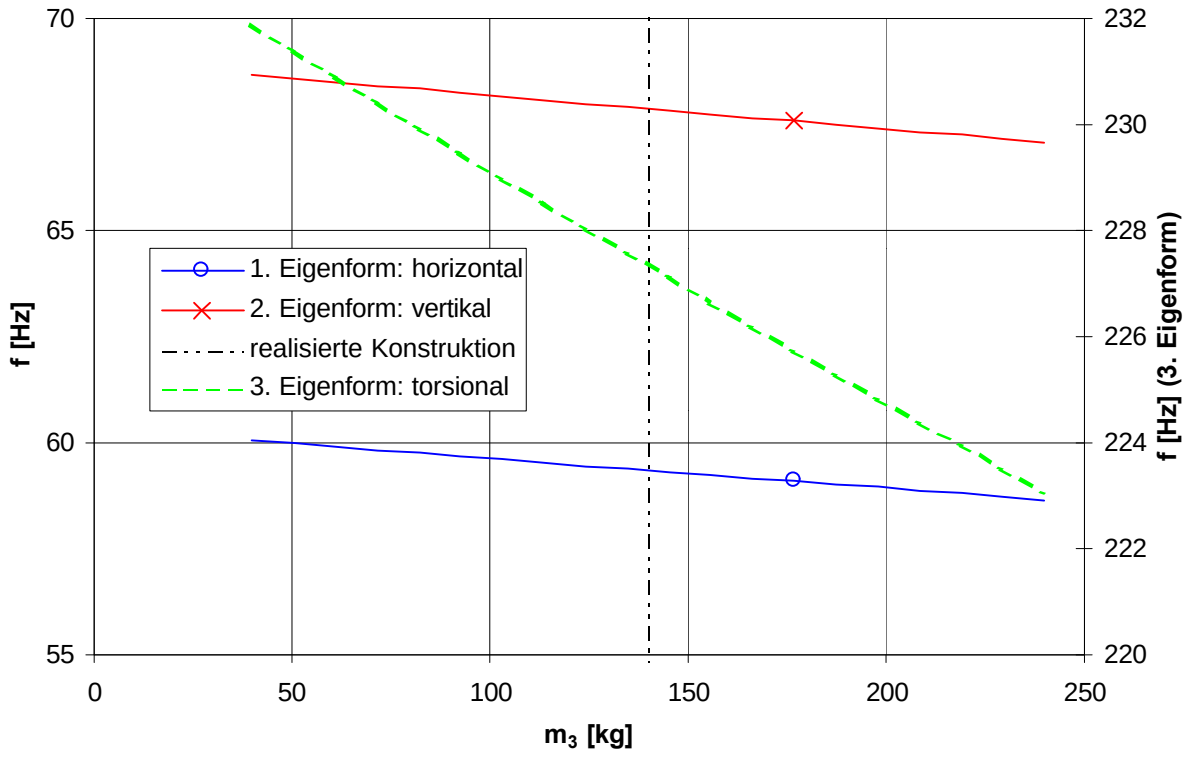


Bild 30: Masse des Überhanges der Hohlwelle.

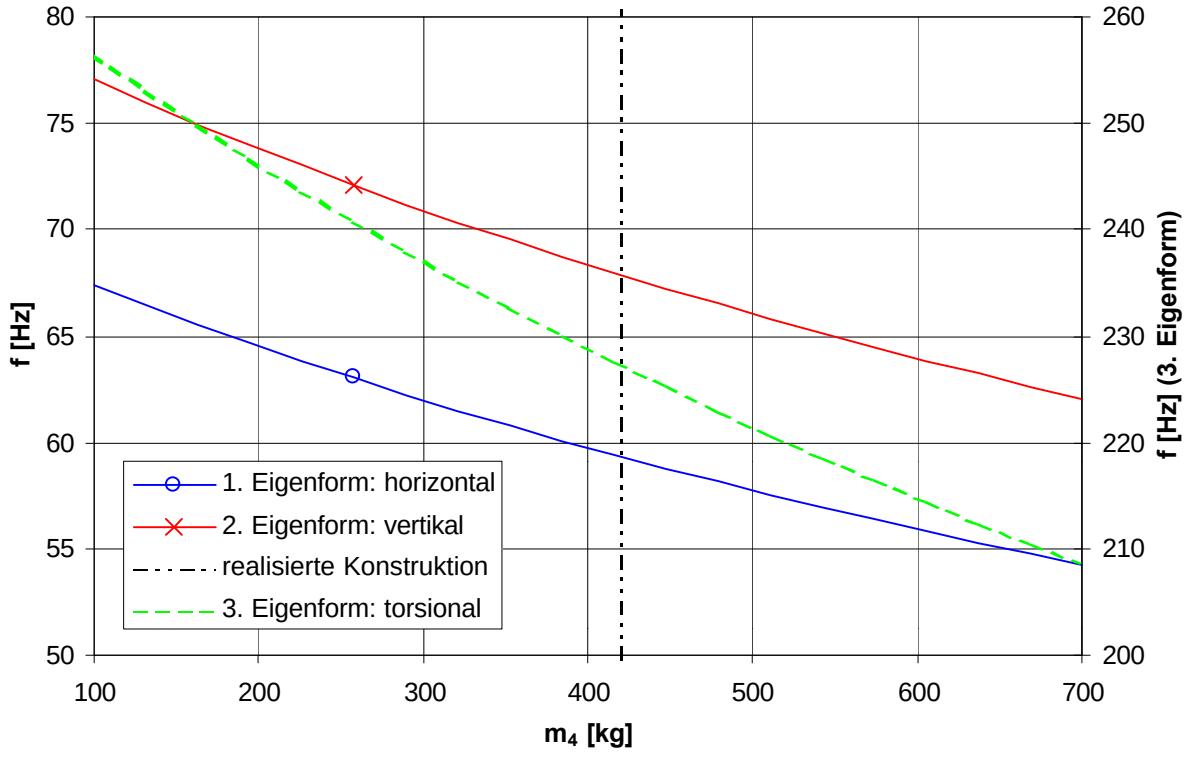


Bild 31: Masse der Dornwelle.

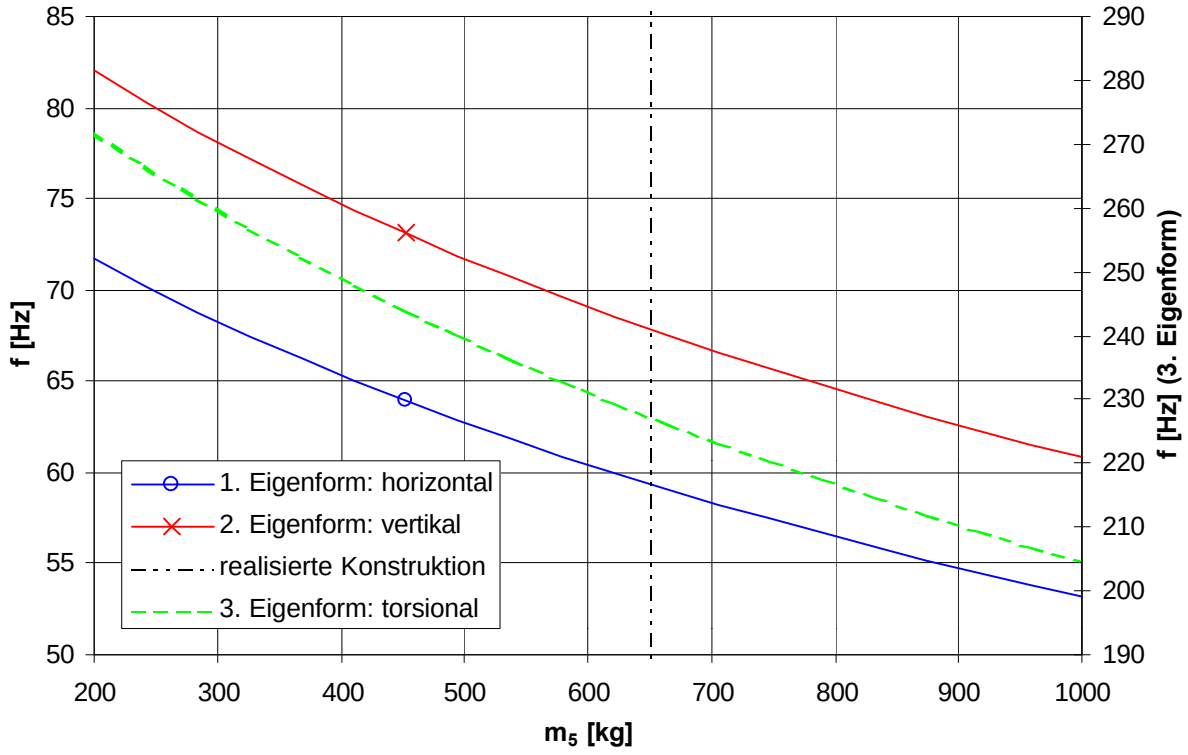


Bild 32: Masse des Rohrhalters.

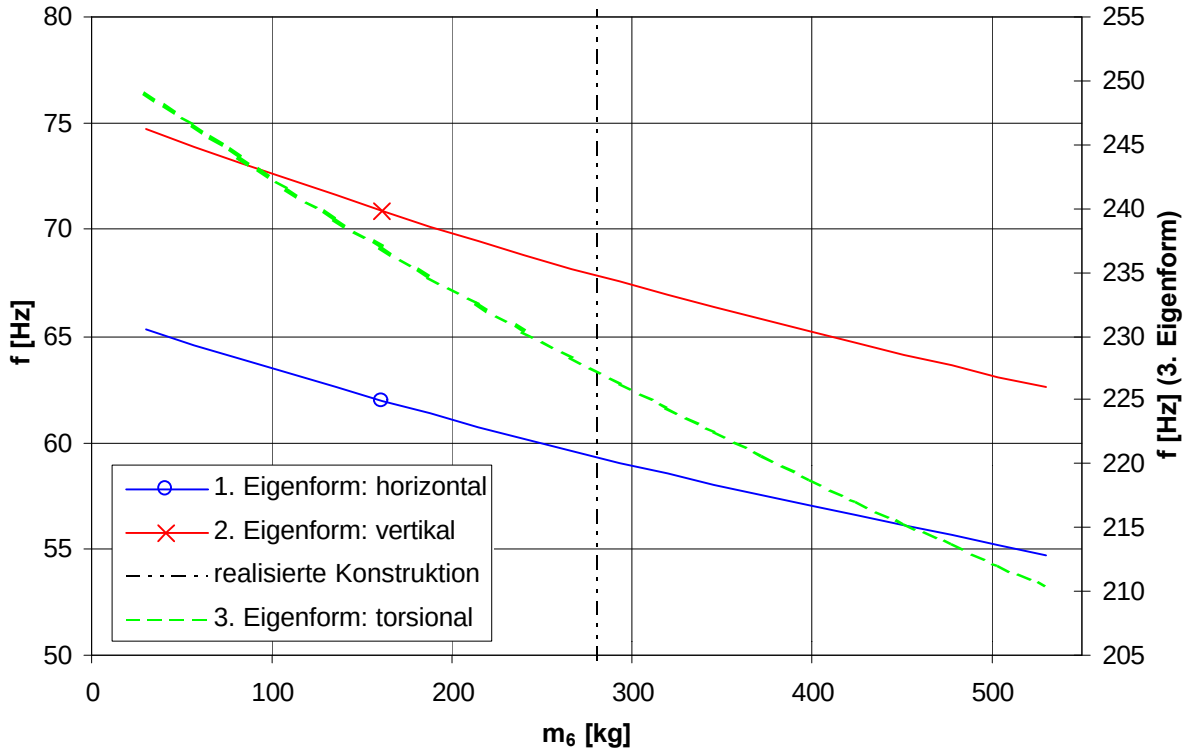


Bild 33: Masse der Auswurfschnecke.

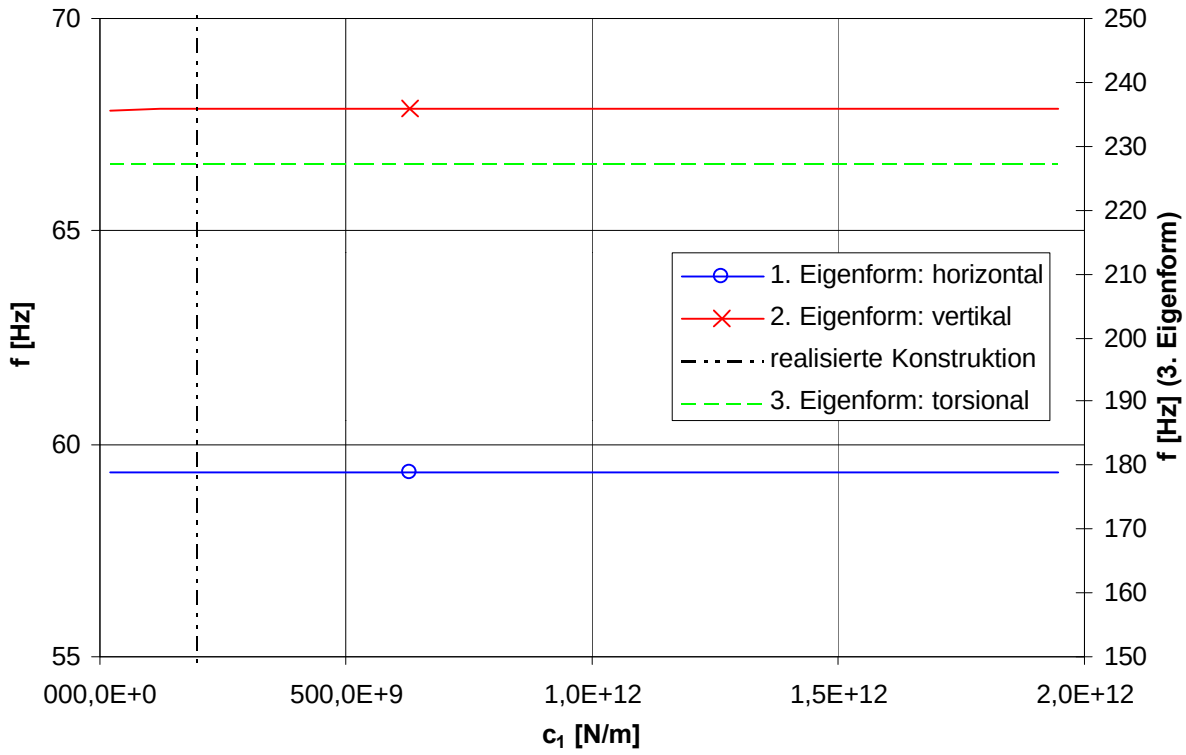


Bild 34: Festlagersteifigkeit.

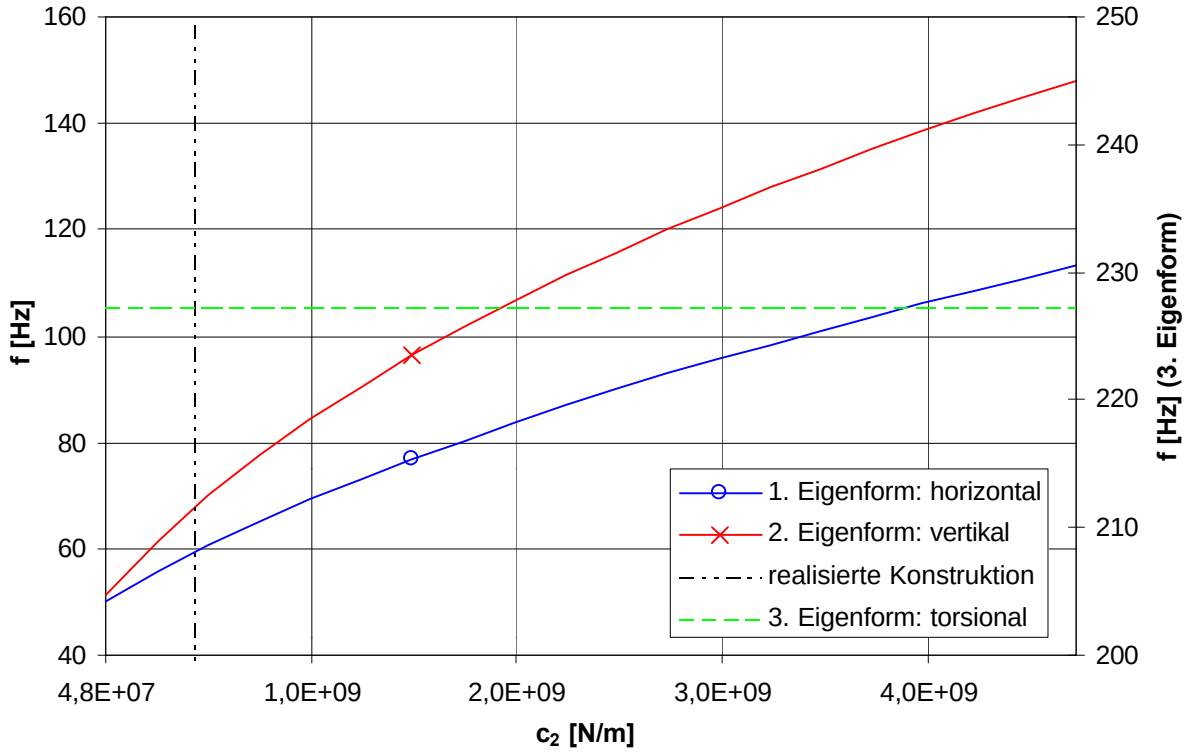


Bild 35: Loslagersteifigkeit.

2.4 Programm

Die Parametervariation wird durch das MS-Excel-Programm (s. unten) ausgeführt. Es erstellt für jede Parametervariante (Einzelschritt) einen Datensatz. Anschließend wird das FEM-Programm, s. PAFEC [11], aus Excel heraus mit dem Datensatz als Argument aufgerufen. Sobald das FEM-Programm die Berechnung beendet hat, kann das Excel-Programm die Werte der Eigenformen einlesen.

In der Eingabemaske der Parameterstudie (Bild 36) dürfen die Zellen nicht verschoben werden, weil das Excel-Programm die Parameter mittels absoluten Zellangaben ausliest. Die Ergebnisse der Berechnung werden an absolute Zellpositionen in „Tabelle2“ geschrieben, dabei werden die vorherigen Inhalte überschrieben.

Lock-Dateien zum löschen:	C:\PAFEC\PUBLIC\LCK*.*
Programmname mit Pfad von Pafec:	C:\pafec\PAFEC85\RUN1\PAFRUN.exe
Verzeichnis in dem die Datenfiles erstellt werden:	C:\Pafec\berg\kldt\1\

Start

			Modellwerte	Intervall		
				Startwert	Endwert	Schritte
Flächenträgheitsmoment ($I_p = I_{xx} + I_{yy}$, $I_{xx} = I_{yy}$)	I_1	[m^4]	80,00E-6	60,0E-6	100,0E-6	20
	I_2	[m^4]	2,80E-3	1,0E-3	5,0E-3	20
	I_3	[m^4]	3,20E-3	1,0E-3	5,0E-3	20
	I_4	[m^4]	30,00E-3	10,0E-3	50,0E-3	20
Abstand vom Festlager zum Antrieb	x_1	[m]	0,32	0,05	1	20
Abstand vom Festlager zum Loslager	x_2	[m]	1,1495	0,4	1,3	20
Abstand vom Festlager zum Ende der Hohlwelle	x_3	[m]	1,385	1,2	2,5	20
Abstand vom Festlager zum Ende der Schnecke	x_4	[m]	2,652	2,5	4	20
Querschnitt	A_1	[m^2]	50,00E-3	5,00E-3	100,00E-3	20
	A_2	[m^2]	190,00E-3	50,00E-3	320,00E-3	20
	A_3	[m^2]	90,00E-3	10,00E-3	200,00E-3	20
	A_4	[m^2]	500,00E-3	100,00E-3	900,00E-3	20
Masse zwischen Festlager und Antrieb	m_1	[kg]	80	10	150	20
Masse zwischen Antrieb und Loslager	m_2	[kg]	300	50	450	20
Masse des Hohlwellenüberhanges	m_3	[kg]	140	40	240	20
Masse der Dornwelle	m_4	[kg]	420	100	700	20
Masse des Rohrhalters	m_5	[kg]	650	200	1000	20
Masse der Schnecke	m_6	[kg]	280	30	530	20
Festlagersteifigkeit	c_1	[N/m]	1,95E+11	19,49E+9	1,95E+12	20
Loslagersteifigkeit	c_2	[N/m]	4,77E+08	47,68E+6	4,77E+9	20

Modell-Eigenwerte neu berechnen

1. Eigenform: horizontal	59,34 Hz
2. Eigenform: vertikal	67,86 Hz
3. Eigenform: torsional	227,35 Hz

Bild 36: Eingabemaske der Parameterstudie.

```
Private Const Pattern As String = "#.0####E+0"

Dim Pfad, Prog, Locked As String
Dim I1, I2, I3, I4
Dim x1, x2, x3, x4
Dim A1, A2, A3, A4
Dim m1, m2, m3, m4, m5, m6
Dim c1, c2
Dim Schritte, i

Dim Zeile, wert As String

Private Sub Eigenwerte_Click()
   Locked = Me.Cells(1, 2)
   Prog = Me.Cells(2, 2)
   Pfad = Me.Cells(3, 2)

   BerechneFEM "Mo", 1, 2, 1, 0, 9, 10, 11, 12

End Sub

Private Sub Start_Click()
   Locked = Me.Cells(1, 2)
   Prog = Me.Cells(2, 2)
   Pfad = Me.Cells(3, 2)

   BerechneFEM "Mo", 1, 2, 1, 0, 9, 10, 11, 12

   BerechneFEM "I1", Me.Cells(7, 5), Me.Cells(7, 6), Me.Cells(7, 7), 3, 1, 2, 3, 4
   BerechneFEM "I2", Me.Cells(8, 5), Me.Cells(8, 6), Me.Cells(8, 7), 3, 5, 6, 7, 8
   BerechneFEM "I3", Me.Cells(9, 5), Me.Cells(9, 6), Me.Cells(9, 7), 3, 9, 10, 11, 12
   BerechneFEM "I4", Me.Cells(10, 5), Me.Cells(10, 6), Me.Cells(10, 7), 3, 13, 14, 15, 16

   BerechneFEM "x1", Me.Cells(11, 5), Me.Cells(11, 6), Me.Cells(11, 7), 3, 17, 18, 19, 20
   BerechneFEM "x2", Me.Cells(12, 5), Me.Cells(12, 6), Me.Cells(12, 7), 3, 21, 22, 23, 24
   BerechneFEM "x3", Me.Cells(13, 5), Me.Cells(13, 6), Me.Cells(13, 7), 3, 25, 26, 27, 28
   BerechneFEM "x4", Me.Cells(14, 5), Me.Cells(14, 6), Me.Cells(14, 7), 3, 29, 30, 31, 32

   BerechneFEM "A1", Me.Cells(15, 5), Me.Cells(15, 6), Me.Cells(15, 7), 3, 33, 34, 35, 36
   BerechneFEM "A2", Me.Cells(16, 5), Me.Cells(16, 6), Me.Cells(16, 7), 3, 37, 38, 39, 40
   BerechneFEM "A3", Me.Cells(17, 5), Me.Cells(17, 6), Me.Cells(17, 7), 3, 41, 42, 43, 44
   BerechneFEM "A4", Me.Cells(18, 5), Me.Cells(18, 6), Me.Cells(18, 7), 3, 45, 46, 47, 48

   BerechneFEM "m1", Me.Cells(19, 5), Me.Cells(19, 6), Me.Cells(19, 7), 3, 49, 50, 51, 52
   BerechneFEM "m2", Me.Cells(20, 5), Me.Cells(20, 6), Me.Cells(20, 7), 3, 53, 54, 55, 56
   BerechneFEM "m3", Me.Cells(21, 5), Me.Cells(21, 6), Me.Cells(21, 7), 3, 57, 58, 59, 60
   BerechneFEM "m4", Me.Cells(22, 5), Me.Cells(22, 6), Me.Cells(22, 7), 3, 61, 62, 63, 64
   BerechneFEM "m5", Me.Cells(23, 5), Me.Cells(23, 6), Me.Cells(23, 7), 3, 65, 66, 67, 68
   BerechneFEM "m6", Me.Cells(24, 5), Me.Cells(24, 6), Me.Cells(24, 7), 3, 69, 70, 71, 72

   BerechneFEM "c1", Me.Cells(25, 5), Me.Cells(25, 6), Me.Cells(25, 7), 3, 73, 74, 75, 76
   BerechneFEM "c2", Me.Cells(26, 5), Me.Cells(26, 6), Me.Cells(26, 7), 3, 77, 78, 79, 80

   ' Übernahme von Eigenfrequenz und Modellwerten,
   ' um die Tabellen "Änderung*" zu erhalten.
   ' Sonst würden bei der Neuberechnung der Modell-Eigenwerte
   ' die Diagramme der Änderung verfälscht.

   Tabelle6.Cells(1, 1) = CStr(Time) + " " + CStr(Date)
   Tabelle6.Cells(34, 2) = Me.Cells(28, 5)

   Tabelle5.Cells(6, 2) = Me.Cells(28, 5)
```

```
   Tabelle5.Cells(8, 2) = Me.Cells(7, 4)
   Tabelle5.Cells(9, 2) = Me.Cells(8, 4)
   Tabelle5.Cells(10, 2) = Me.Cells(9, 4)
   Tabelle5.Cells(11, 2) = Me.Cells(10, 4)
   Tabelle5.Cells(12, 2) = Me.Cells(11, 4)
   Tabelle5.Cells(13, 2) = Me.Cells(12, 4)
   Tabelle5.Cells(14, 2) = Me.Cells(13, 4)
   Tabelle5.Cells(15, 2) = Me.Cells(14, 4)
   Tabelle5.Cells(16, 2) = Me.Cells(15, 4)
   Tabelle5.Cells(17, 2) = Me.Cells(16, 4)
   Tabelle5.Cells(18, 2) = Me.Cells(17, 4)
   Tabelle5.Cells(19, 2) = Me.Cells(18, 4)
   Tabelle5.Cells(20, 2) = Me.Cells(19, 4)
   Tabelle5.Cells(21, 2) = Me.Cells(20, 4)
   Tabelle5.Cells(22, 2) = Me.Cells(21, 4)
   Tabelle5.Cells(23, 2) = Me.Cells(22, 4)
   Tabelle5.Cells(24, 2) = Me.Cells(23, 4)
   Tabelle5.Cells(25, 2) = Me.Cells(24, 4)
   Tabelle5.Cells(26, 2) = Me.Cells(25, 4)
   Tabelle5.Cells(27, 2) = Me.Cells(26, 4)

End Sub

Private Sub BerechneFEM(Kennung As String, _
                        Anfang, _
                        Ende, _
                        Schritte, _
                        Zeile0 As Integer, _
                        Spalte0 As Integer, _
                        Spalte1 As Integer, _
                        Spalte2 As Integer, _
                        Spalte3 As Integer)

' Kennung   - Welcher Parameter eingelesen werden soll
' Anfang    - Intervallanfang
' Ende      - Intervallende
' Schritte  - Anzahl der Intervallschritte
' Zeile0    - Startzeile, ab der die Intervallschritte und Eigenformen
'             in Tabelle2 geschrieben werden
' Spalte0   - Spaltennummer für die Intervallschritte
' Spalte1   - Spaltennummer für die 1. Eigenform
' Spalte2   - Spaltennummer für die 2. Eigenform
' Spalte3   - Spaltennummer für die 3. Eigenform

   I1 = Me.Cells(7, 4)
   I2 = Me.Cells(8, 4)
   I3 = Me.Cells(9, 4)
   I4 = Me.Cells(10, 4)
   x1 = Me.Cells(11, 4)
   x2 = Me.Cells(12, 4)
   x3 = Me.Cells(13, 4)
   x4 = Me.Cells(14, 4)
   A1 = Me.Cells(15, 4)
   A2 = Me.Cells(16, 4)
   A3 = Me.Cells(17, 4)
   A4 = Me.Cells(18, 4)
   m1 = Me.Cells(19, 4)
   m2 = Me.Cells(20, 4)
   m3 = Me.Cells(21, 4)
   m4 = Me.Cells(22, 4)
   m5 = Me.Cells(23, 4)
   m6 = Me.Cells(24, 4)
   c1 = Me.Cells(25, 4)
```

```
c2 = Me.Cells(26, 4)

' Die Modellwerte von x1-x4 müssen erhalten bleiben,
' um die Massen skalieren zu können
x1M = x1
x2M = x2
x3M = x3
x4M = x4

For i = 1 To Schritte

   If Not Kennung = "Mo" Then
      cur = Anfang + (i - 1) * (Ende - Anfang) / (Schritte - 1)

      Tabelle2.Cells(Zeile0 + i, Spalte0) = cur
   End If

   pname = Kennung + "_" + Trim(Str(i))
   OName = Pfad + pname + ".dat"
   IName = Pfad + pname + ".o07"

   '**** Datensatz erzeugen

   Open OName For Output As 1

      SchreibeHeader

      Print #1, "C Variation von:      " + Kennung + " = "; Format(cur, Pattern)
      Print #1, "C                Schritt ="; Str(i)
      Print #1, "C"

      Select Case Kennung
      Case "I1"
         I1 = cur
      Case "I2"
         I2 = cur
      Case "I3"
         I3 = cur
      Case "I4"
         I4 = cur
      Case "x1"
         x1 = cur
      Case "x2"
         x2 = cur
      Case "x3"
         x3 = cur
      Case "x4"
         x4 = cur
      Case "A1"
         A1 = cur
      Case "A2"
         A2 = cur
      Case "A3"
         A3 = cur
      Case "A4"
         A4 = cur
      Case "m1"
         m1 = cur
      Case "m2"
         m2 = cur
      Case "m3"
         m3 = cur
      Case "m4"
```

```
         m4 = cur
      Case "m5"
         m5 = cur
      Case "m6"
         m6 = cur
      Case "c1"
         c1 = cur
      Case "c2"
         c2 = cur
      Case "Mo"
         ' Eigenformen des Modells ausrechnen
      Case Else
         Err.Raise 1, "ErzeugeData", "Kennung eines Parameters nicht bekannt!"
      End Select

      SchreibeNodes x1, x2, x3, x4
      SchreibeElements
      SchreibeRestraints
      SchreibeMaterial x1, x2, x3, x4, _
                       x1M, x2M, x3M, x4M, _
                       A1, A2, A3, A4, _
                       m1, m2, m3, m4, m5, m6
      SchreibeBeams I1, I2, I3, I4, A1, A2, A3, A4
      SchreibeSprings c1, c2
      SchreibeFooter
   Close 1
   DoEvents

   LesenOK = False

   Do  ' (Until LesenOK)

      '***** FEM-Programm Ausführen
      '***** "Warten" auf Programmende (Exec)

      On Error GoTo Fehler
      Kill Locked
      On Error GoTo 0

      Do
         StartZeit = Timer
         ChDir Pfad

         Exec Prog + " " + pname

         '** Wenn nach dem Ende des Programms kein Inputfile vorhanden ist,
         '** ist Pafec auf jeden Fall nicht korrekt ausgeführt worden.
         If Exists(IName) > 0 Then
            On Error GoTo Fehler
            Kill Locked
            On Error GoTo 0
         End If

         DoEvents
      Loop Until Exists(IName) = 0

      '***** Ergebnis einlesen

      Tabelle2.Cells(Zeile0 + i, Spalte1) = ""
      Tabelle2.Cells(Zeile0 + i, Spalte2) = ""
      Tabelle2.Cells(Zeile0 + i, Spalte3) = ""

      Open IName For Input As 3
```

```
            Do While Not EOF(3)
               Line Input #3, Zeile
               If Left(Zeile, 15) = "     MODE SHAPE" Then
                  Line Input #3, Zeile

                  ' "   FREQUENCY (HZ)" abschneiden
                  Zeile = Right(Zeile, Len(Zeile) - 17)
                  ' führende Spaces abschneiden
                  Zeile = LTrim(Zeile)
                  wert = Left(Zeile, InStr(1, Zeile, " ") - 1)  '*** 1. Eigenform
                  Tabelle2.Cells(Zeile0 + i, Spalte1) = Val(wert)

                  ' das erste Ergebnis abschneiden
                  Zeile = Right(Zeile, Len(Zeile) - InStr(1, Zeile, " ") + 1)
                  Zeile = LTrim(Zeile)
                  wert = Left(Zeile, InStr(1, Zeile, " ") - 1)  '*** 2. Eigenform
                  Tabelle2.Cells(Zeile0 + i, Spalte2) = Val(wert)

                  ' das zweite Ergebnis abschneiden
                  Zeile = Right(Zeile, Len(Zeile) - InStr(1, Zeile, " ") + 1)
                  Zeile = LTrim(Zeile)
                  wert = Left(Zeile, InStr(1, Zeile, " ") - 1)  '*** 3. Eigenform
                  Tabelle2.Cells(Zeile0 + i, Spalte3) = Val(wert)

                  LesenOK = True

                  Exit Do
               End If
               DoEvents
            Loop

         Close 3

         DoEvents

      Loop Until LesenOK

      '*** Die Fehlerbehandlungsroutine ist notwendig, da es vorkommen kann,
      '*** daß die zu löschenden Dateien noch nicht alle geschlossen sind.
      On Error GoTo Fehler

      '***** alle Dateien diesen Datensatzes löschen
      Kill Pfad + pname + ".*"

      On Error GoTo 0
   Next

   Exit Sub

Fehler:
   Select Case Err.Number  ' Evaluate error number.
      Case 53
         ' Es sind keine Lockdateien vorhanden.
         Resume Next
      Case 70 ' "Zugriff verweigert"
         Resume
      Case 75 ' "Fehler beim Zugriff auf Pfad/Datei"
         Resume
      Case Else
         Err.Raise (Err.Number)
   End Select
   Resume Next
```

```
End Sub

Private Sub SchreibeHeader()
   Print #1, "C Modelldaten"
   Print #1, "C"
   Print #1, "C   I1 =  "; Format(I1, Pattern); Tab(22); "m^4"
   Print #1, "C   I2 =  "; Format(I2, Pattern); Tab(22); "m^4"
   Print #1, "C   I3 =  "; Format(I3, Pattern); Tab(22); "m^4"
   Print #1, "C   I4 =  "; Format(I4, Pattern); Tab(22); "m^4"
   Print #1, "C   x1 =  "; Format(x1, Pattern); Tab(22); "m"
   Print #1, "C   x2 =  "; Format(x2, Pattern); Tab(22); "m"
   Print #1, "C   x3 =  "; Format(x3, Pattern); Tab(22); "m"
   Print #1, "C   x4 =  "; Format(x4, Pattern); Tab(22); "m"
   Print #1, "C   A1 =  "; Format(A1, Pattern); Tab(22); "m^2"
   Print #1, "C   A2 =  "; Format(A2, Pattern); Tab(22); "m^2"
   Print #1, "C   A3 =  "; Format(A3, Pattern); Tab(22); "m^2"
   Print #1, "C   A4 =  "; Format(A4, Pattern); Tab(22); "m^2"
   Print #1, "C   m1 =  "; Format(m1, Pattern); Tab(22); "kg"
   Print #1, "C   m2 =  "; Format(m2, Pattern); Tab(22); "kg"
   Print #1, "C   m3 =  "; Format(m3, Pattern); Tab(22); "kg"
   Print #1, "C   m4 =  "; Format(m4, Pattern); Tab(22); "kg"
   Print #1, "C   m5 =  "; Format(m5, Pattern); Tab(22); "kg"
   Print #1, "C   m6 =  "; Format(m6, Pattern); Tab(22); "kg"
   Print #1, "C   c1 =  "; Format(c1, Pattern); Tab(22); "N/m"
   Print #1, "C   c2 =  "; Format(c2, Pattern); Tab(22); "N/m"
   Print #1, "C"
End Sub

Private Sub SchreibeNodes(x1, x2, x3, x4)
   Print #1, "CONTROL"
   Print #1, "CONTROL.END"
   Print #1, "C"
   Print #1, "C"
   Print #1, "C ** Die NODES verwenden kartesische Koordinaten"
   Print #1, "C"
   Print #1, "C"
   Print #1, "NODES"
   Print #1, "Z=          0.0000"
   Print #1, "   NODE       X               Y"

   For k = 1 To 10
      Print #1, Tab(4); Str(k); Tab(13); _
                Format(1 + (k - 1) * x1 / 9, Pattern); Tab(30); "1.0000"
   Next
   For k = 1 To 9
      Print #1, Tab(4); Str(k + 10); Tab(13); _
                Format(1 + x1 + k * (x2 - x1) / 9, Pattern); Tab(30); "1.0000"
   Next
   For k = 1 To 9
      Print #1, Tab(4); Str(k + 19); Tab(13); _
                Format(1 + x2 + k * (x3 - x2) / 9, Pattern); Tab(30); "1.0000"
   Next
   For k = 1 To 9
      Print #1, Tab(4); Str(k + 28); Tab(13); _
                Format(1 + x3 + k * (x4 - x3) / 9, Pattern); Tab(30); "1.0000"
   Next
   Print #1, Tab(4); " 38"; Tab(13); "1.0000"; Tab(30); "0.5000"
   Print #1, Tab(4); " 39"; Tab(13); Format(1 + x2, Pattern); Tab(30); "0.5000"

   Print #1, "C"
   Print #1, "C"
End Sub
```

```
Private Sub SchreibeElements()
   Print #1, "ELEMENTS"
   Print #1, "GROU=1"
   Print #1, "  NUMB  ELEM  PROP  TOPO"
   Print #1, "C ------------------------------"
   Print #1, "C Balken"
   Print #1, "C ------------------------------"
   Print #1, "     1 34100     1     1     2"
   Print #1, "     2 34100     1     2     3"
   Print #1, "     3 34100     1     3     4"
   Print #1, "     4 34100     1     4     5"
   Print #1, "     5 34100     1     5     6"
   Print #1, "     6 34100     1     6     7"
   Print #1, "     7 34100     1     7     8"
   Print #1, "     8 34100     1     8     9"
   Print #1, "     9 34100     1     9    10"
   Print #1, "C"
   Print #1, "    10 34100     2    10    11"
   Print #1, "    11 34100     2    11    12"
   Print #1, "    12 34100     2    12    13"
   Print #1, "    13 34100     2    13    14"
   Print #1, "    14 34100     2    14    15"
   Print #1, "    15 34100     2    15    16"
   Print #1, "    16 34100     2    16    17"
   Print #1, "    17 34100     2    17    18"
   Print #1, "    18 34100     2    18    19"
   Print #1, "C"
   Print #1, "    19 34100     3    19    20"
   Print #1, "    20 34100     3    20    21"
   Print #1, "    21 34100     3    21    22"
   Print #1, "    22 34100     3    22    23"
   Print #1, "    23 34100     3    23    24"
   Print #1, "    24 34100     3    24    25"
   Print #1, "    25 34100     3    25    26"
   Print #1, "    26 34100     3    26    27"
   Print #1, "    27 34100     3    27    28"
   Print #1, "C"
   Print #1, "    28 34100     4    28    29"
   Print #1, "    29 34100     4    29    30"
   Print #1, "    30 34100     4    30    31"
   Print #1, "    31 34100     4    31    32"
   Print #1, "    32 34100     4    32    33"
   Print #1, "    33 34100     4    33    34"
   Print #1, "    34 34100     4    34    35"
   Print #1, "    35 34100     4    35    36"
   Print #1, "    36 34100     4    36    37"
   Print #1, "C ------------------------------"
   Print #1, "C Federn"
   Print #1, "C ------------------------------"
   Print #1, "    37 30100     5     1    38"
   Print #1, "    38 30100     6    19    39"
   Print #1, "C"
   Print #1, "C"
End Sub

Private Sub SchreibeFooter()
   Print #1, "MODES.AND.FREQUENCIES"
   Print #1, "AUTO MODE"
   Print #1, " 20   10"
   Print #1, "C"
   Print #1, "END.OF.DATA"
End Sub
```

```
Private Sub SchreibeRestraints()
   Print #1, "RESTRAINTS"
   Print #1, "NODE DIRE"
   Print #1, "C ------------------------------------------------------"
   Print #1, "C NODE NUMBER     DIRECTION     Balken"
   Print #1, "C ------------------------------------------------------"
   Print #1, "      1            13456"
   Print #1, "      2            1"
   Print #1, "      3            1"
   Print #1, "      4            1"
   Print #1, "      5            1"
   Print #1, "      6            1"
   Print #1, "      7            1"
   Print #1, "      8            1"
   Print #1, "      9            1"
   Print #1, "     10            1"
   Print #1, "     11            1"
   Print #1, "     12            1"
   Print #1, "     13            1"
   Print #1, "     14            1"
   Print #1, "     15            1"
   Print #1, "     16            1"
   Print #1, "     17            1"
   Print #1, "     18            1"
   Print #1, "     19            1"
   Print #1, "     20            1"
   Print #1, "     21            1"
   Print #1, "     22            1"
   Print #1, "     23            1"
   Print #1, "     24            1"
   Print #1, "     25            1"
   Print #1, "     26            1"
   Print #1, "     27            1"
   Print #1, "     28            1"
   Print #1, "     29            1"
   Print #1, "     30            1"
   Print #1, "     31            1"
   Print #1, "     32            1"
   Print #1, "     33            1"
   Print #1, "     34            1"
   Print #1, "     35            1"
   Print #1, "     36            1"
   Print #1, "     37            1"
   Print #1, "C"
   Print #1, "C"
   Print #1, "RESTRAINTS"
   Print #1, "DIRE = 654321"
   Print #1, "NODE"
   Print #1, "C ------------------------------------------------------"
   Print #1, "C NODE NUMBER         Federendpunkte"
   Print #1, "C ------------------------------------------------------"
   Print #1, "     38"
   Print #1, "     39"
   Print #1, "C"
   Print #1, "C"
End Sub

Private Sub SchreibeMaterial(x1, x2, x3, x4, _
                             x1M, x2M, x3M, x4M, _
                             A1, A2, A3, A4, _
                             m1, m2, m3, m4, m5, m6)
   Print #1, "MATERIAL"
   Print #1, "   MATERIAL   E            NU           RO         ALPHA"
```

```
   Print #1, "*             MU           K            SH          BULK"
   Print #1, "C"
   Print #1, "      1  2.09000E+12  3.00000E-01   "; _
             Format(m1 / A1 / x1M, Pattern); Tab(49); "1.10000E-05"
   Print #1, "*         .50000E-02   .48000E+02   .45200E+03   .17400E+12"
   Print #1, "C"
   Print #1, "      2  2.09000E+12  3.00000E-01   "; _
             Format(m2 / A2 / (x2M - x1M), Pattern); _
             Tab(49); "1.10000E-05"
   Print #1, "*         .50000E-02   .48000E+02   .45200E+03   .17400E+12"
   Print #1, "C"
   Print #1, "      3  2.09000E+12  3.00000E-01   "; _
             Format(m3 / A3 / (x3M - x2M), Pattern); _
             Tab(49); "1.10000E-05"
   Print #1, "*         .50000E-02   .48000E+02   .45200E+03   .17400E+12"
   Print #1, "C"
   Print #1, "      4  2.09000E+12  3.00000E-01   "; _
             Format((m4 * (x4 - x3) / (x4M - x3M) + m5 + m6) / _
             A4 / (x4 - x3), Pattern); _
             Tab(49); "1.10000E-05"
   Print #1, "*         .50000E-02   .48000E+02   .45200E+03   .17400E+12"
   Print #1, "C"
   Print #1, "C"
End Sub

Private Sub SchreibeBeams(I1, I2, I3, I4, A1, A2, A3, A4)
   Print #1, "BEAMS"
   Print #1, "  SECTION  MATERIAL  IYY         IZZ         TORSIONAL   AREA"
   Print #1, "     1        1"; Tab(22); Format(I1, Pattern); Tab(34); _
             Format(I1, Pattern); Tab(46); Format(2 * I1, Pattern); Tab(58); _
             Format(A1, Pattern)
   Print #1, "     2        2"; Tab(22); Format(I2, Pattern); Tab(34); _
             Format(I2, Pattern); Tab(46); Format(2 * I2, Pattern); Tab(58); _
             Format(A2, Pattern)
   Print #1, "     3        3"; Tab(22); Format(I3, Pattern); Tab(34); _
             Format(I3, Pattern); Tab(46); Format(2 * I3, Pattern); Tab(58); _
             Format(A3, Pattern)
   Print #1, "     4        4"; Tab(22); Format(I4, Pattern); Tab(34); _
             Format(I4, Pattern); Tab(46); Format(2 * I4, Pattern); Tab(58); _
             Format(A4, Pattern)
   Print #1, "C"
   Print #1, "C"
End Sub

Private Sub SchreibeSprings(c1, c2)
   Print #1, "SPRINGS"
   Print #1, "  NUMBER  KY          KZ"
   Print #1, "    5"; Tab(11); Format(c1, Pattern); Tab(24); Format(c1 / 2, Pattern)
   Print #1, "    6"; Tab(11); Format(c2, Pattern); Tab(24); Format(c2 / 2, Pattern)
   Print #1, "C"
   Print #1, "C"
End Sub

Public Function Exists(filename As Variant) As Integer
'Funktion testet, ob eine Datei existiert.
'Rückgabewert:
'0 - Datei existiert
'1 - Datei existiert NICHT
'2 - Der in filename enthaltene Pfad existiert nicht.
'    d.h. die Datei existiert ebenfalls nicht.

   Dim fn_test
```

```
   Exists = 0

   On Error GoTo Fehler

   fn_test = FreeFile
   Open filename For Input As fn_test
   Close fn_test

   Exit Function
Fehler:
   Select Case Err.Number  ' Evaluate error number.
      Case 53 ' "File not found" error.
         Exists = 1
      Case 55 ' "File already open" error.
         Exists = 3
      Case 76 ' "Path not found" error.
         Exists = 2
      Case Else
         Exists = 4
   End Select
   Resume Next
End Function

Public Sub Exec(fname As Variant)
   Dim ProgID As Variant
   Dim ready As Boolean

   ProgID = Shell(fname, vbMinimizedNoFocus)

   On Error GoTo Fehler

   ready = False
   Do
      AppActivate ProgID
      DoEvents
   Loop Until ready

   Exit Sub
Fehler:
   Select Case Err.Number
      Case 5
         ready = True
      Case Else
         Err.Raise (Err.Number)
   End Select
   Resume Next
End Sub
```

3. Experimentelle Untersuchung

3.1 Versuchsaufbau und Datenakquirierung

Am 17.08.99 wurde am Windungsleger (Ader 1) der Firma STFS in Esch/Luxemburg eine Messung durchgeführt. Es wurden die Drehzahl des Windungslegers, Schwingung des Gehäuses, der Schalldruckpegel im Fernfeld und die Leistungsaufnahme des Motors gemessen.

Der Außendurchmesser der Auswurfschnecke betrug 1080 mm und die Kegelradübersetzung des Antriebs 41/62.

Der Beschleunigungsaufnehmer wurde in der Ebene des Loslagers horizontal angebracht (s. Bild 8).

Für die Leistungsaufnahme des Motors wurden die Anker- und Shunt-Spannung gemessen. Die Meßwerte der Spannungen und die Motordrehzahl wurden von einem Mitarbeiter von STFS aufgenommen. Der Widerstand des Shunts wurde als Relation (150mV $\rightarrow$ 1500A) angegeben.

Es wurden folgende Meßgeräte verwendet:

- optoelektronischer TTL-Drehzahlgeber
- B&K Mikrophon 4133
- B&K Pistonphon 4220 (Lp = 124,0 dB bei 250 Hz)
- B&K Beschleunigungsaufnehmer 4371
- B&K Schwingungskalibrator 4294 (10,03 m/s^2 bei 159,2 Hz)
- B&K Ladungsverstärker 2535

  Einstellungen:

Trans Sens:	1,003 pC/ms^{-2}
Schalter mV/Unit Out:	100
Untere Frequenzgrenze:	0,2 Hz Acc.
Obere Frequenzgrenze:	1,0 kHz

Die Messung wurde auf einem Datenrekorder (Sony Dat Recorder PC204) aufgezeichnet und später mit der Auswertesoftware PAK[1] ausgewertet.

Da die Anlage am Tag der Messung gewartet wurde, konnten nur stationäre Betriebspunkte aufgenommen werden. Die Versuchsplanung sah die Messung einer langsamen Hochfahrt des Windungslegers über einen Zeitraum von ca. 15 min vor, die nicht durchgeführt werden konnte.

[1] Prüfstands-Akustik-Meßsystem der Müller-BBM Vibro Akustik Systeme GmbH

3.2 Motordrehzahl

Bei einem Vergleich der gemessenen Motordrehzahl mit der Angabe von STFS konnte ein Unterschied festgestellt werden. Im nachstehenden Diagramm ist die Motordrehzahl basierend auf verschiedenen Daten dargestellt. Unter der Legende stehen die Formeln der Regressionsgeraden und deren Bestimmtheitsmaß.

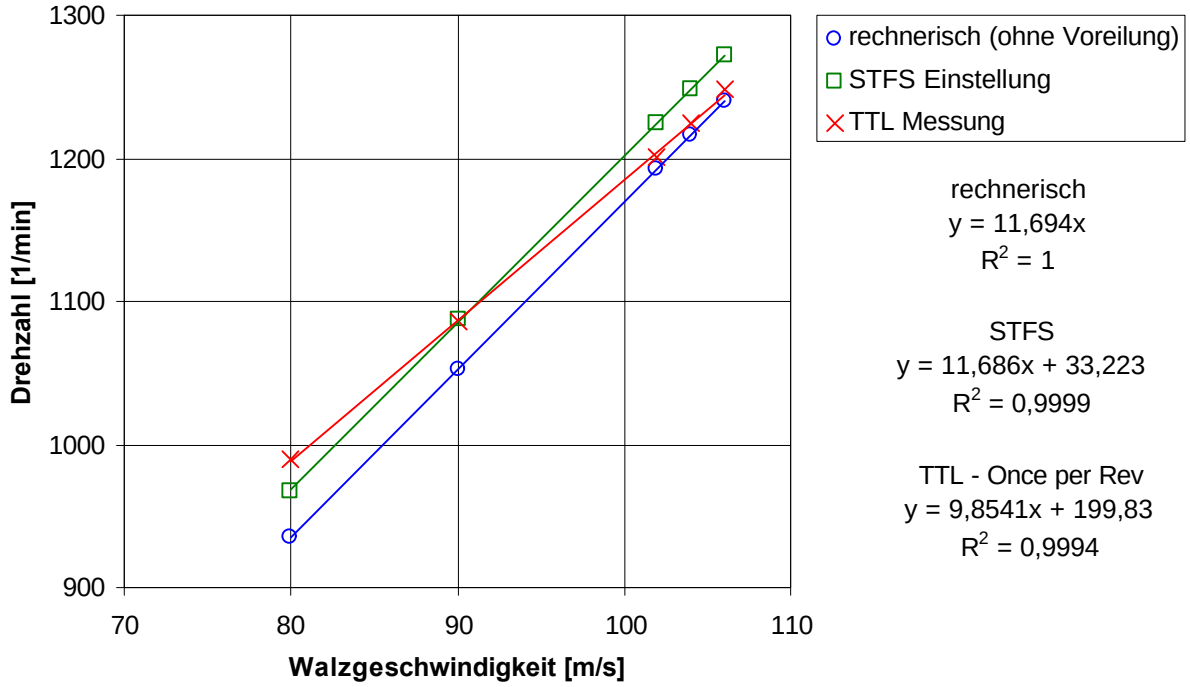


Bild 37: Motordrehzahl.

An die rechnerische Motordrehzahl gelangt man, wenn man die Walzgeschwindigkeit mit dem Außendurchmesser der Auswurfschnecke und dem Übersetzungsverhältnis der Kegelradstufe nach folgender Formel in Bezug setzt:

$$n_M = i \cdot \frac{v_w}{D_S} \quad .$$

Man kann eine Proportionalität zwischen der rechnerischen Drehzahl und der Drehzahl, die STFS einstellt, erkennen (s.Bild 37). Diese Proportionalität ist die Voreilung, damit der Draht zwischen dem letzten Walzgerüst und dem Windungsleger unter Zug steht.

Bei dem optoelektronischem Drehzahlgeber wird die Zeitdifferenz zwischen zwei Refelexionen eines Lichtstrahls an einer Reflektormarke gemessen. Diese Information wird als Rechteck-Signal nach der TTL-Spezifikation ausgegeben. Es wurde die Windungslegerdrehzahl gemessen. Über das Übersetzungsverhältnis der Kegelradstufe gelangt man an die Motordrehzahl. Um auszuschließen, daß es sich bei der Drehzahlmessung aus dem TTL-Signal um eine Fehlmessung handelt, wurde der Fehler der Meßreihen bestimmt. Dabei ergab sich nur ein sehr kleiner Fehler (s. Fehlerrechnung Kap. 3.6).

Deutlich kann man dabei sehen, daß die gemessene Drehzahl (TTL) nicht der Einstellung (STFS) entspricht. Wenn die Walzgeschwindigkeit noch weiter gesteigert wird, wird die Abweichung so groß, daß die Voreilung nicht mehr gegeben ist. Somit steht der Draht ab einer Walzgeschwindigkeit von 106 m/s nicht mehr unter Zug und bricht aus. Darin besteht eine Möglichkeit, warum die Anlage bei STFS noch nicht die zugesagte Walzgeschwindigkeit erreicht.

3.3 Korrelation zwischen Motorleistung und Walzgeschwindigkeit

Zur Abschätzung der Leistungsaufnahme im Leerlauf bei höherer Walzgeschwindigkeit soll eine Beziehung hergeleitet werden. Hierzu wurden Messungen der Leistungsaufnahme am Windungsleger Typ D durchgeführt.

Unter der Annahme, daß sich die Leistungsaufnahme im Leerlauf aus der Lagerreibung und dem Strömungswiderstand zusammensetzt, wird die Korrelation zwischen Motorleistung und Walzgeschwindigkeit hergeleitet. Der Strömungswiderstand muß berücksichtigt werden, da die großen Umfangsgeschwindigkeiten zu Verlusten führen können. Leerlauf bedeutet in diesem Zusammenhang, daß der Windungsleger läuft, aber kein Draht gewunden wird. Im weiteren Verlauf wird daher von Leerlaufleistung gesprochen.

Für den Zusammenhang der Antriebsleistung von Reibung und Strömungswiderstand wird der folgende Ansatz gewählt:

$$P(v) = a_3 \cdot v^3 + a_1 \cdot v \ .$$

Der Leistungsverlust der Lagerreibung verhält sich linear und der Leistungsverlust des Strömungswiderstandes mit der dritten Ordnung.

Die Koeffizienten a_3 und a_1 lassen sich mit der Gauß'schen Minimumbedingung ermitteln (vgl. Bartsch [4]).

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - P(v_i) \right]^2 \rightarrow \min$$

Hierbei ist Q die Summe der Abweichungsquadrate.

Dann setzt man den Ansatz ein.

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \left(a_3 \cdot {v_i}^3 + a_1 \cdot v_i \right) \right]^2$$

Die a_k findet man durch partielle Ableitung von Q nach den a_k.

$$\frac{dQ}{da_k} = 0 \qquad k = 1, 3$$

$$\frac{dQ}{da_1} = \sum_{i=1}^{n} -2 \cdot \left(y_i - a_3 \cdot {v_i}^3 - a_1 \cdot v_i \right) \cdot v_i = 0$$

$$\frac{dQ}{da_3} = \sum_{i=1}^{n} -2 \cdot \left(y_i - a_3 \cdot {v_i}^3 - a_1 \cdot v_i \right) \cdot {v_i}^3 = 0$$

Daraus läßt sich ein lineares Gleichungssystem erstellen.

$$a_3 \cdot \sum_{i=1}^{n} {v_i}^4 + a_1 \cdot \sum_{i=1}^{n} {v_i}^2 = \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot y_i$$

$$a_3 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} {v_i}^6 + a_1 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} {v_i}^4 = \sum_{i=0}^{n-1} {v_i}^3 \cdot y_i$$

Das Gleichungssystem läßt sich mittels Matrizenrechnung lösen.

$$a = A^{-1} \cdot B$$

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} v_i^4 & \sum_{i=1}^{n} v_i^2 \\ \sum_{i=1}^{n} v_i^6 & \sum_{i=1}^{n} v_i^4 \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot y_i \\ \sum_{i=1}^{n} v_i^3 \cdot y_i \end{bmatrix}$$

Für die v_i muß man die Walzgeschwindigkeiten in *m/s* und für die y_i die errechneten Leistungen in *kW* einsetzen.

Für denWindungsleger mit Rohrhalter erhält man: $a = \begin{bmatrix} 2{,}45275 \cdot 10^{-5} \\ 0{,}12924 \end{bmatrix}$

Für den Windungsleger nur mit Dornwelle erhält man: $a = \begin{bmatrix} 4{,}55959 \cdot 10^{-6} \\ 0{,}11785 \end{bmatrix}$

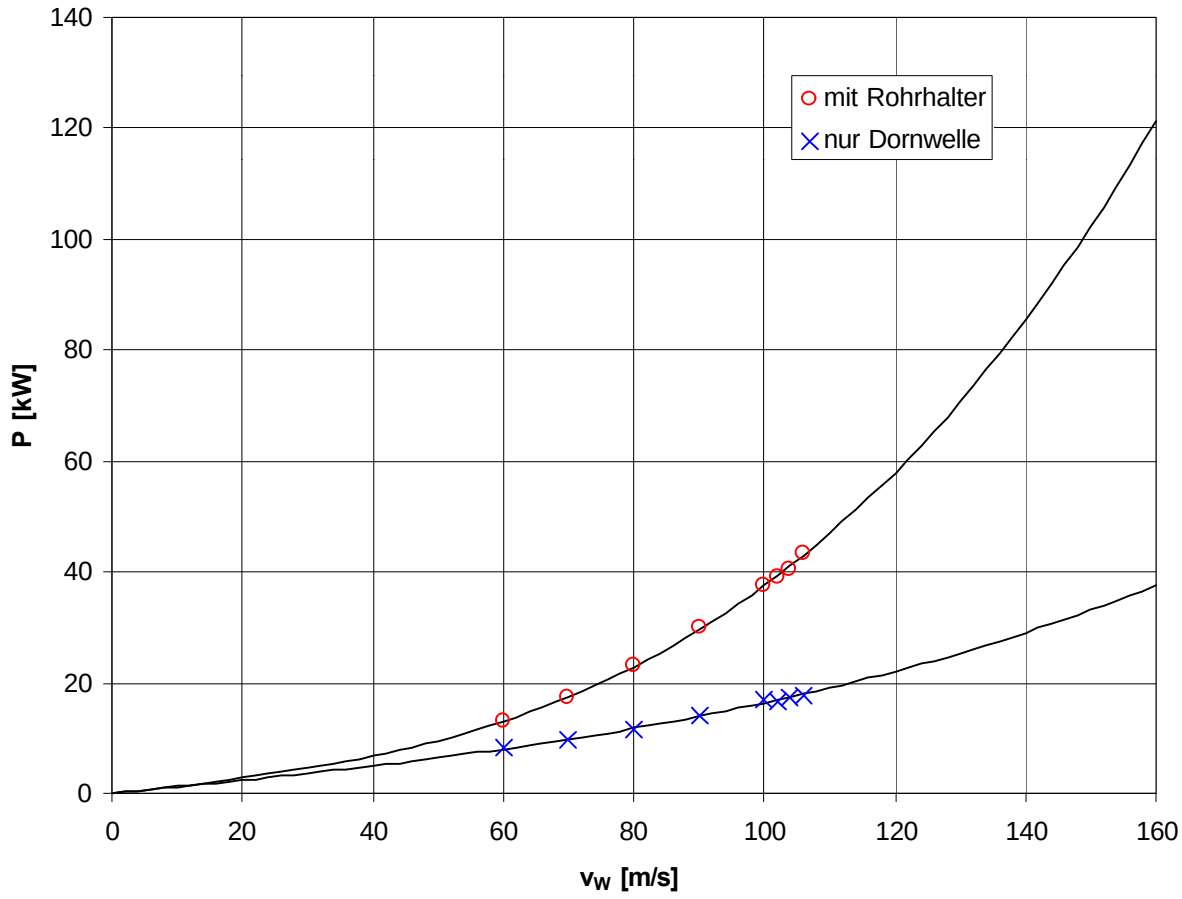


Bild 38: Motorleistung.

In Bild 38 sind die Kurven nach dem gewählten Ansatz mit den ermittelten Koeffizienten gezeichnet. Man sieht, daß die Kurven sehr gut durch Punkte der Meßwerte laufen.

Somit kann mit der nachstehenden Formel die Leerlaufleistung auch für höhere Geschwindigkeiten abgeschätzt werden.

$$P = 2{,}453 \cdot 10^{-5} \cdot v_w{}^3 + 0{,}129 \cdot v_w$$

Einheiten: v_w [m/s]
P [kW]

In der nachstehenden Tabelle sind für zwei ausgewählte Walzgeschwindigkeiten die zu erwartenden Leistungsaufnahmen aufgeführt.

v_W [m/s]	P (mit Rohrhalter) [kW]	P (nur Dornwelle) [kW]
120	57,89	22,02
140	85,40	29,01

Diese Angaben gelten für den Windungsleger Typ D. Werden Änderungen an der Konstruktion vorgenommen, so kann sich die Leerlaufleistung durch unterschiedliche Lagerverluste (Änderung der Massen) oder aerodynamischen Verluste (Änderung der Form) ebenfalls ändern.

3.4 Stömungswiderstand

Zur Reduzierung der Leerlaufleistung erfolgt eine Untersuchung der Strömungsverluste. Mit dem Ergebnis der Korrelation von Motorleistung und Walzgeschwindigkeit lassen sich die Anteile von Strömungswiderstand und Lagerreibung zeigen.

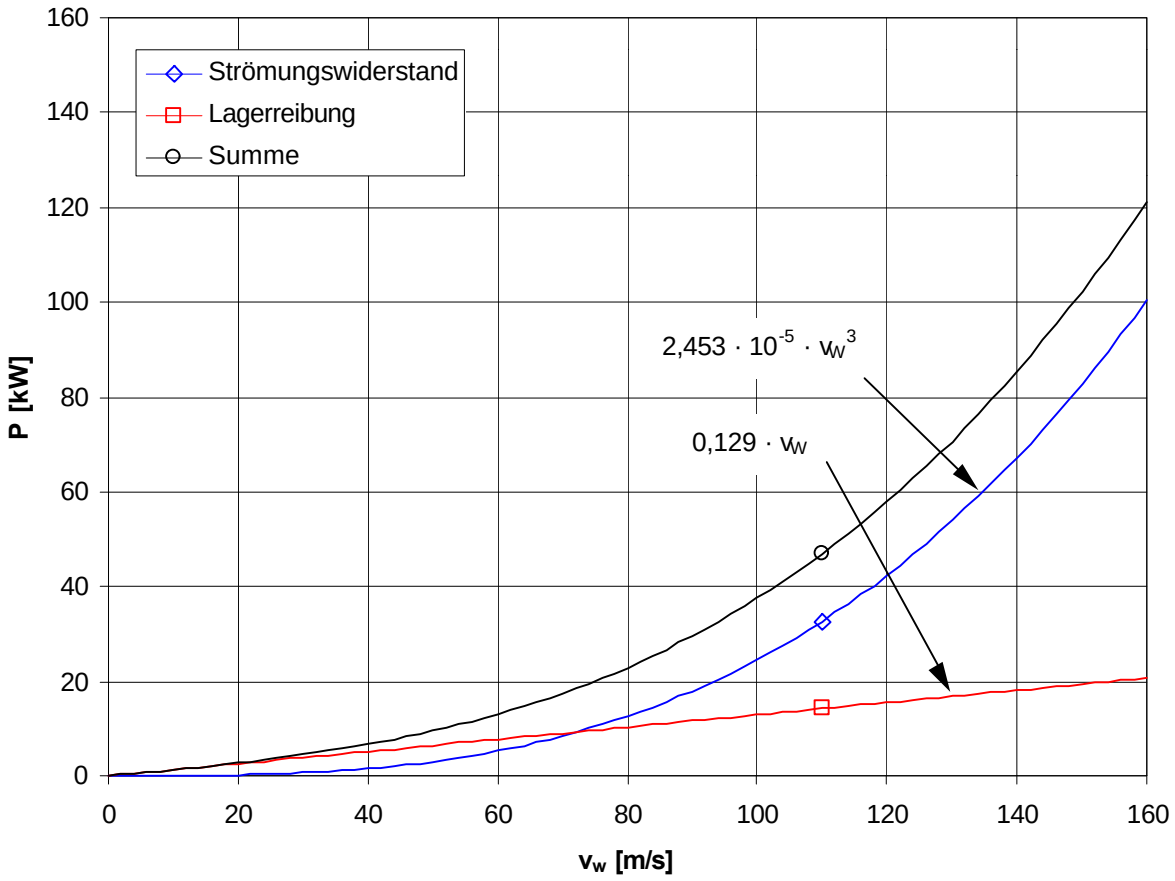


Bild 39: Leistungsverlust (mit Rohrhalter).

In der Auftragung der Leistungsverlustanteile des Rohrhalters (Bild 39) kann man sehen, daß ab einer Walzgeschwindigkeit von ungefähr 73 m/s die strömungsmechanischen Verluste größer als die Lagerreibung sind. In dem betrachteten Walzgeschwindigkeitsbereich (100 – 140 m/s) sind die strömungsmechanischen Verluste dominat.

v_W [m/s]	$P_{Strömungswiderstand}$ [kW]	$P_{Lagerreibung}$ [kW]	P_{Summe} [kW]
120	42,38	15,51	57,89
140	67,30	18,09	85,40

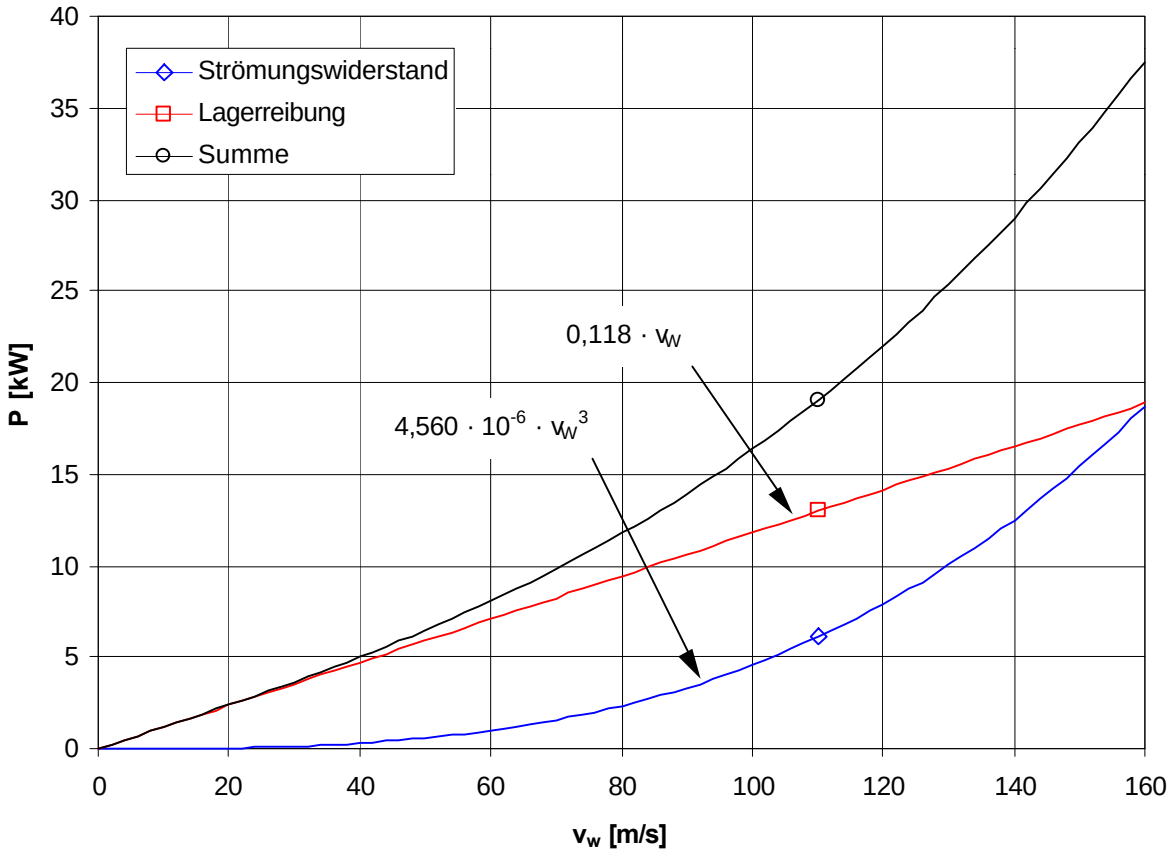


Bild 40: Leistungsverlust (nur Dornwelle).

Wenn man nur die Dornwelle rotieren läßt, zeigt sich in der Darstellung der Verlustanteile (Bild 40), daß die strömungsmechanischen Verluste erst ab einer Walzgeschwindigkeit von etwa 160 m/s überwiegen würden.

3.4.1 Theoretischer Strömungswiderstand

Ob ein Reduktionspotential des Strömungswiderstandes und damit der Leerlaufleistung des Windungsleger vorhanden ist, soll abgeschätzt werden. Für die Abschätzung wird der theoretische Strömungswiderstande berechnet.

Um den strömungsmechanischen Verlust theoretisch nachzuvollziehen, ist zunächst der Strömungswiderstand durch Reibung an der Oberfläche von Interesse. Da die Geometrie von Rohrhalter und Schnecke eine diskrete Bestimmung des Strömungswiderstandes sehr umfangreich machen würde, wird eine vereinfachte Kontur angenommen.

Die Kontur besteht aus vier Zylindermantelflächen (1) mit verschiedenen Radien und einer Kreisscheibe als Stirnfläche (2). Die Kreisringflächen, die an den Absätzen der Zylinder entstehen, werden zu einer zweiten Kreisscheibe zusammengefaßt.

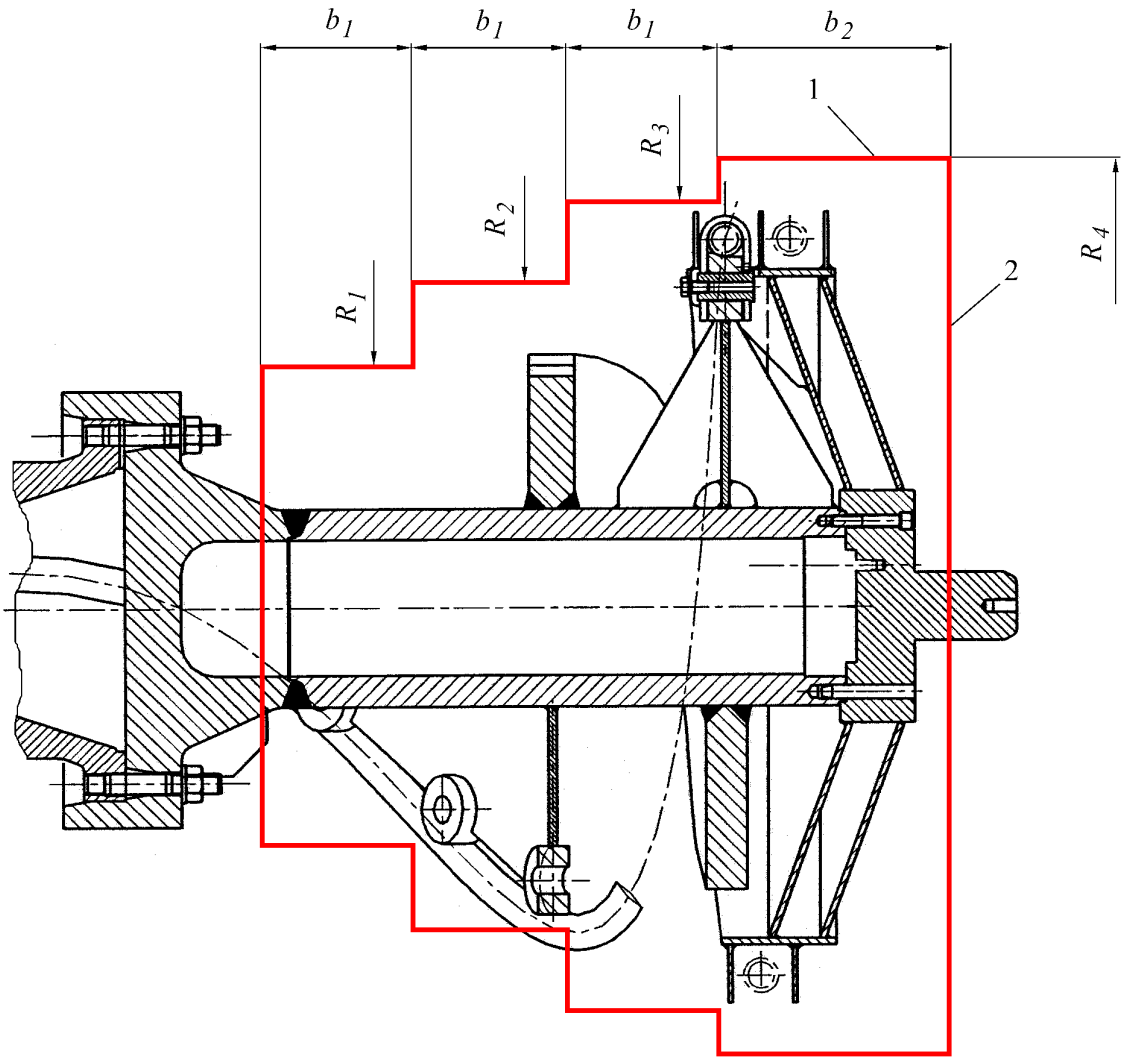


Bild 41: Vereinfachte Kontur für die Berechnung des Strömungswiderstandes (nach [10]).

Die Form des Rohrhalters läßt die Vermutung zu, daß der Windungsleger zusätzlich wie eine Pumpe oder ein Verdichter arbeitet, so daß eine Förderarbeit berücksichtigt werden müsste. Die Förderarbeit hängt dabei direkt vom Massenstrom ab. Eine frühere Messung des Massenstroms mit einer Hitzdrahtsonde an Spalten und vor dem Windungsleger hat gezeigt, daß der Massenstrom vermutlich verschwindend gering ist. Daraus wird gefolgert, daß die Förderarbeit vernachlässigt werden kann.

Weiterhin kann davon ausgegangen werden, daß es zu Ablösungen am Rohrhalter kommt. Den Leistungsverlust durch die Ablösungen kann man nicht direkt berechnen. Man kann allerdings sagen, daß der Leistungsverlust geringer ausfallen wird, wenn der Rohrhalter eine rotationssymmetrische Verkleidung erhält. Als Verkleidung wäre eine kegelförmige Kontur denkbar.

Das unter dieser Vereinfachung gewonnene Ergebnis wird größer als der wahre Strömungswiderstand ausfallen, weil die Oberfläche der Kontur gößer ist als in Realität. Somit befindet man sich bei dem Vergleich mit dem Meßergebnis auf der sicheren Seite.

Der theoretische Strömungswiderstand wird exemplarisch bei einer Walzgeschwindigkeit von 106 m/s berechnet. Dies ist die höchste Walzgeschwindigkeit, für die Messungen der Leerlaufleistung vorliegen. Es werden weitere Werte für die Rechnung benötigt:

Radien:	$R_1 \approx 290$ mm
	$R_2 \approx 420$ mm
	$R_3 \approx 500$ mm
	$R_4 \approx 585$ mm
Breite:	$b_1 \approx 200$ mm
	$b_2 \approx 365$ mm
Oberflächenrauheit des Zylinders:	$k = 0{,}03$ mm (Annahme)
Drehzahl:	$n = 1887\ \text{min}^{-1}$ ($\rightarrow v_w = 106$ m/s)
	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 197{,}6\ \text{s}^{-1}$
Dichte der Luft:	$\rho = 1\ \text{kg/m}^3$
Kinematische Viskosität der Luft:	$\nu = 1{,}5 \cdot 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}$

Der Flächenwiderstand einer umströmten ebenen Platte wird berechnet mit, vgl. Bohl (1991) S. 174 [1]:

$$F_{w,R} = c_F \cdot \frac{r}{2} \cdot w_\infty{}^2 \cdot O \ .$$

An den Leistungsverlust gelangt man, indem man die Widerstandskraft mit der Umfangsgeschwindigkeit multipliziert:

$$P_V = F_{w,R} \cdot U \ .$$

Wenn man für O die Mantelfläche des Zylinders, für w_∞ die Umfangsgeschwindigkeit einsetzt und die „einseitige“ Umströmung berücksichtigt, dann erhält man für den Leistungsverlust des Zylinders:

$$P_{v,1} = c_F \cdot \frac{r}{2} \cdot R^4 \cdot p \cdot w^3 \cdot b \ .$$

Der Reibleistungsverlust einer sich in ruhendem Medium rotierenden einseitig benetzten Radscheibe ist, vgl. Bohl (1991) S. 177 [1]:

$$P_{v,2} = c_M \cdot \frac{r}{4} \cdot w^3 \cdot R^5 \ .$$

Um die Beiwerte c_f und c_M zu ermitteln, muß man die Art der Grenzschicht kennen. Mit der Reynoldszahl läßt sich diese bestimmen.

$$\mathrm{Re} = \frac{R^2 \cdot w}{n}$$

$\mathrm{Re} = 4{,}5 \cdot 10^6 \rightarrow$ Die Grenzschicht ist turbulent (hydraulisch rauh).

Die Beiwerte für eine hydraulisch rauhe Grenzschicht betragen, vgl. Bohl (1991) S. 175 [1]:

$$c_F = \frac{1}{\left(1{,}89 + 1{,}62 \cdot \lg \frac{2 \cdot R \cdot p}{k}\right)^{2{,}5}}$$

$c_F\,(R_1) = 3{,}47 \cdot 10^{-3}$

$c_F\,(R_2) = 3{,}24 \cdot 10^{-3}$

$c_F\,(R_3) = 3{,}14 \cdot 10^{-3}$

$c_F\,(R_4) = 3{,}06 \cdot 10^{-3}$

$$c_M = \frac{0{,}69}{\left(1{,}12 + \lg \frac{R}{k}\right)^{2{,}5}}$$

$c_M\,(R_4) = 1{,}01 \cdot 10^{-2}$

Daraus ergibt sich:

$P_{v,1}\,(R_1) = 0{,}06$ kW

$P_{v,1}\,(R_2) = 0{,}25$ kW

$P_{v,1}\,(R_3) = 0{,}48$ kW

$P_{v,1}\,(R_4) = 1{,}59$ kW

$P_{v,2} = 1{,}34$ kW

$P_v = P_{v,1}\,(R_1) + P_{v,1}\,(R_2) + P_{v,1}\,(R_3) + P_{v,1}\,(R_4) + 2 \cdot P_{v,2} = 5{,}06$ kW

Der Leistungsverlust der theoretischen Berechnung beträgt $P_v = 5{,}06$ kW bei einer Walzgeschwindigkeit von 106 m/s.

Der Anteil des gemessenen Leistungsverlustes, der auf die Strömungsmechanik aufgrund von Reibung zurückgeführt wird, beträgt:

$$P_{v,\mathrm{Messung}} = a_3 \cdot v_W^{\,3}$$
$$= 2{,}435 \cdot 10^{-5} \cdot 106^{\,3} = 29{,}2 \text{ kW}$$

Der gemessene Leistungsverlust ist beinahe um den Faktor sechs größer als der Errechnete. Daraus läßt sich ableiten, daß vermutlich ein deutliches Potential für die Reduzierung des Strömungswiderstandes vorhanden ist und daß die oben erwähnten Wirbelablösungen einen wesentlichen Anteil an den Strömungsverlusten haben könnten. Eine Verminderung um die Hälfte erscheint möglich.

Unter der Annahme, daß die Strömungsverluste halbiert werden können, ergeben sich die folgenden Leerlaufverluste für den Windungsleger. Das bedeutet bei einem dreischichtigen Walzbetrieb einer einadrigen Drahtstraße in einer Zeit von t = 7200 h, einer Nutzung von η = 80% und einem Strompreis von k = 0,10 DM/kWh eine Energiekosteneinsparung von:

$$\Delta K = t \cdot h \cdot k \cdot \Delta P \ .$$

v_W [m/s]	P_{Ist} [kW]	P_{Neu} [kW]	ΔP [kW]	ΔK [DM]
120	57,89	36,70	21,19	12 205
140	85,40	51,75	33,65	19 382

3.5 Frequenzanalyse

Für die Abnahme des Windungslegers durch den Betreiber bezüglich der Schwingung wird die VDI-Richtlinie 2056, Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen [6], als Bewertungsschema herangezogen. Die effektive Schwinggeschwindigkeit darf bei einer Klassifizierung des Windungslegers als Großmaschine 4,5 mm/s nicht überschreiten.

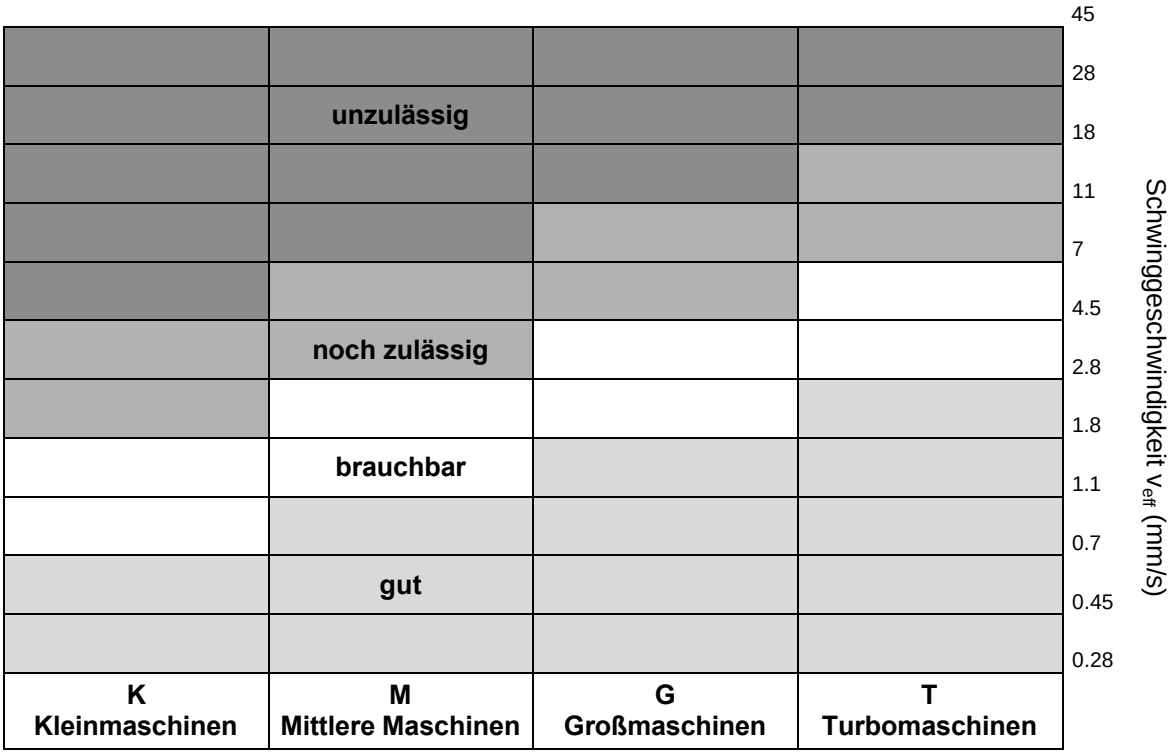


Bild 42: Schwingstärkenklassifizierung nach VDI 2056 (ISO 2372) [6].

Zur Ermittlung der Quellmechanismen der Schwingung ist diese Richtlinie nicht geeignet. Es muß eine Frequenzanalyse durchgeführt werden.

Die Bezeichnung der Peaks in den Frequenzspektren setzt sich aus der Ordnung der Harmonischen und einem Buchstaben zusammen. Der Buchstabe kennzeichnet die Quelle, wobei R für Rohrhalter und M für Motor steht.

Die Meßstelle befand sich in horizontaler Richtung in der Ebene des Loslagers (s. Bild 8).

Um die Amplituden der Schwingbeschleunigung (A) aus den Frequenzspektren in Amplituden der Schwinggeschwindigkeit (V) umzurechnen, muß man die Beschleunigung integrieren. Der Ansatz lautet:

$$v = \int a \, dt \ .$$

Mit der Funktion für die harmonische Schwingung der Beschleunigung,

$$a = A \cdot \sin(w \cdot t) ,$$

erhält man die Funktion für die Schwinggeschwindigkeit:

$$v = -A \cdot \frac{1}{w} \cdot \cos(w \cdot t)$$

$$v = -A \cdot \frac{1}{2 \cdot p \cdot f} \cdot \cos(w \cdot t) = -V \cdot \cos(w \cdot t) \ .$$

Da in den Spektren die Beträge der Amplituden aufgetragen sind, erhält man für die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit:

$$V = \frac{A}{2 \cdot p \cdot f} \ .$$

Einige Peaks sind in Bild 43 bis Bild 47 nicht markiert, für diese konnte keine Quelle gefunden werden.

Die Frequenzen der Kegelradstufe konnten an einigen Stellen erkannt werden. Da diese aber nur sehr gering aus dem Rauschen heraustraten, sind diese vernachlässigbar.

Auch mit Hilfe additiver Verknüpfung verschiedener Frequenzkomponenten (z.B. 2R – 1M) sind keine weiteren Zuordnungen möglich.

Im folgenden werden Spektren der Meßstelle bei verschiedenen Drehzahlen respektive Walzgeschwindigkeit gezeigt, allerdings im Leerlaufbetrieb.

Die Auswertung der Frequenzspektren hat gezeigt, daß die Schwingung hauptsächlich auf die Drehfrequenz von Rohrhalter und Motor und deren Harmonische zurückzuführen ist. Dabei ist die erste Harmonische des Rohrhalters (1R) durchweg dominant.

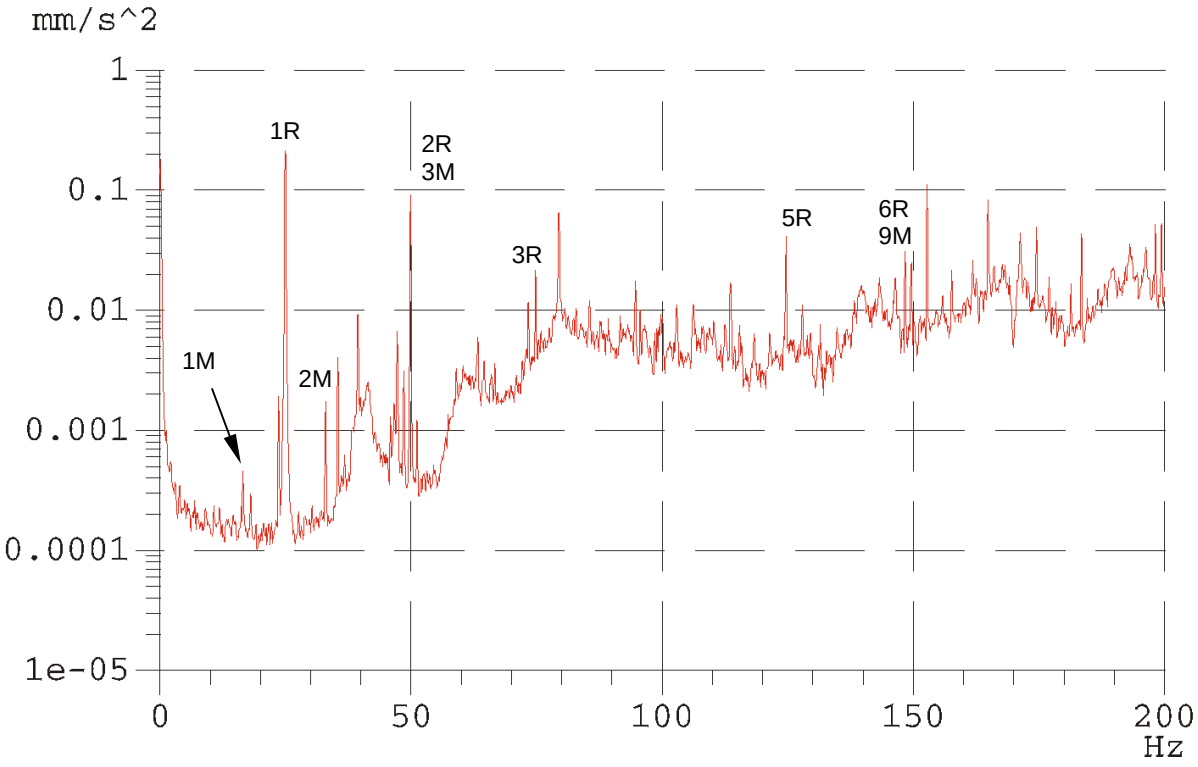


Bild 43: Frequenzspektrum bei 80 m/s.

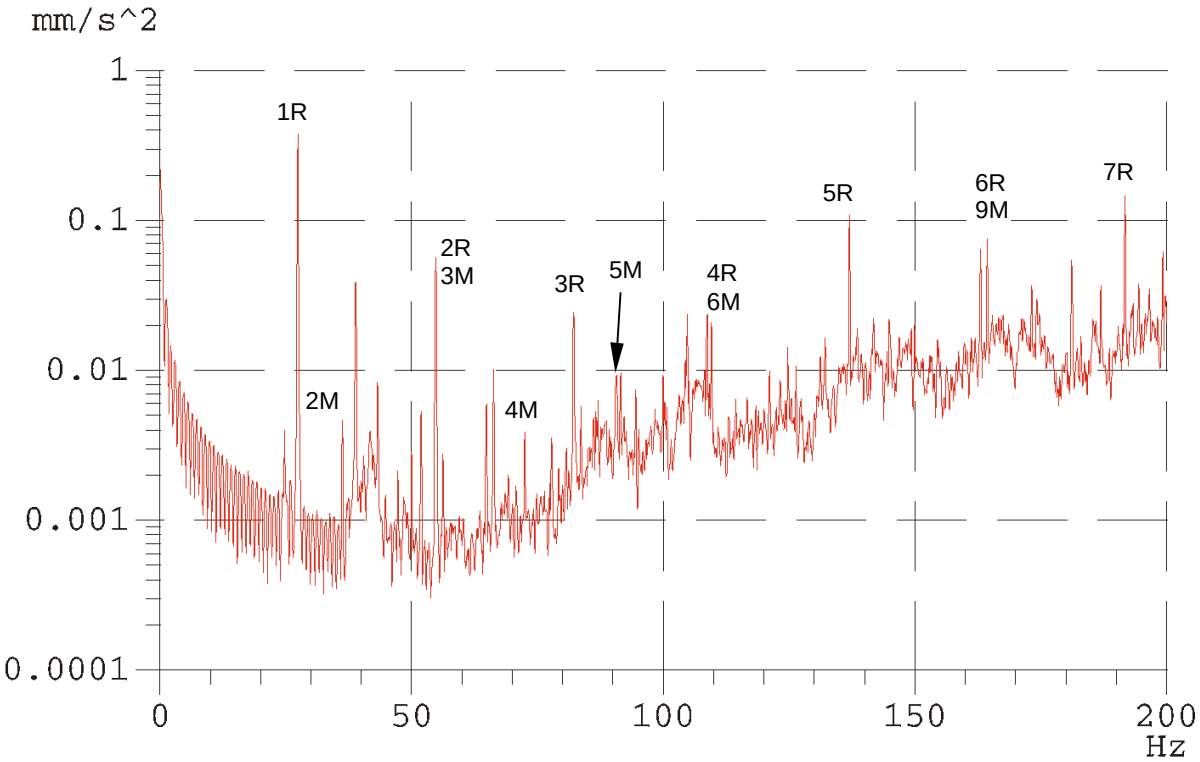


Bild 44: Frequenzspektrum bei 90 m/s.

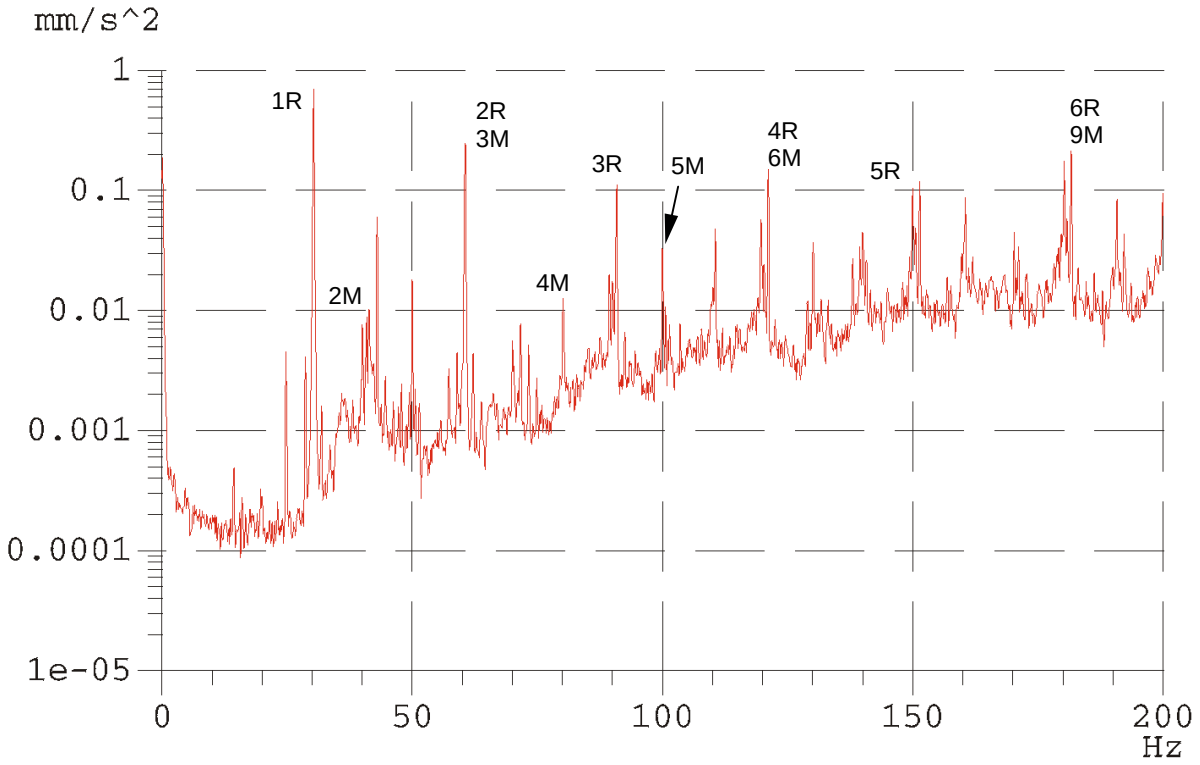


Bild 45: Frequenzspektrum bei 102 m/s.

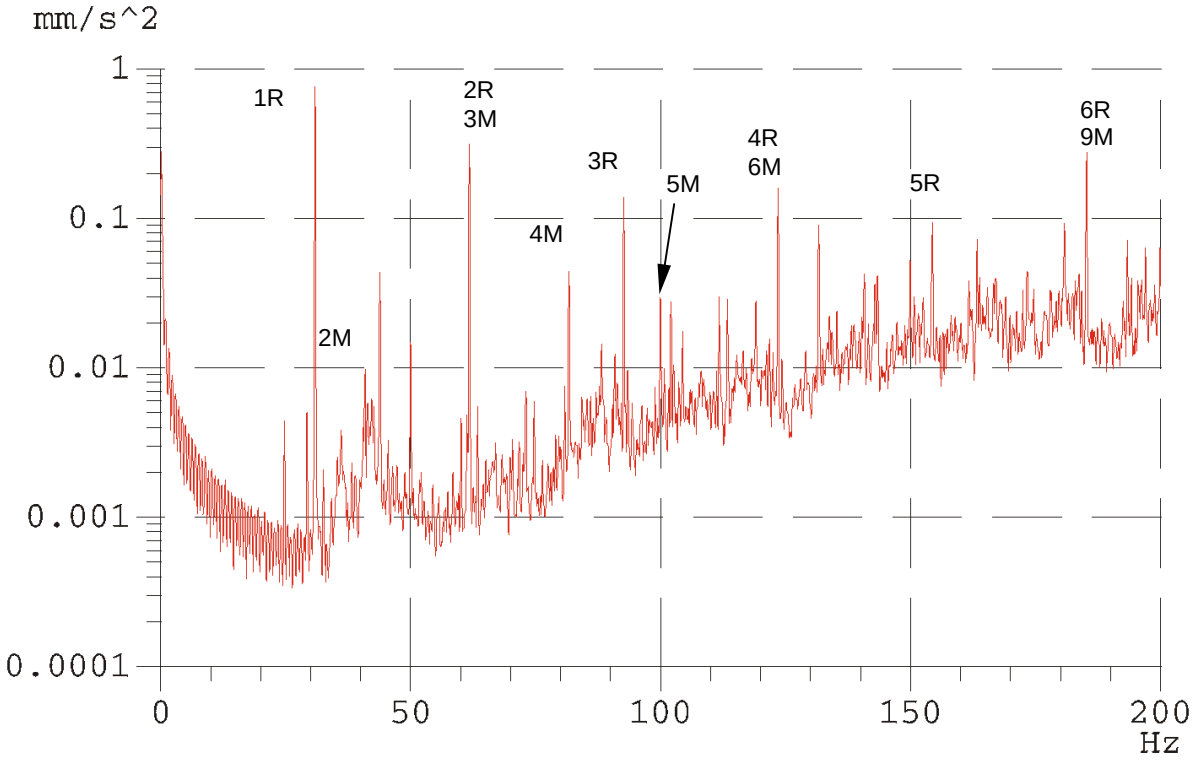


Bild 46: Frequenzspektrum bei 104 m/s.

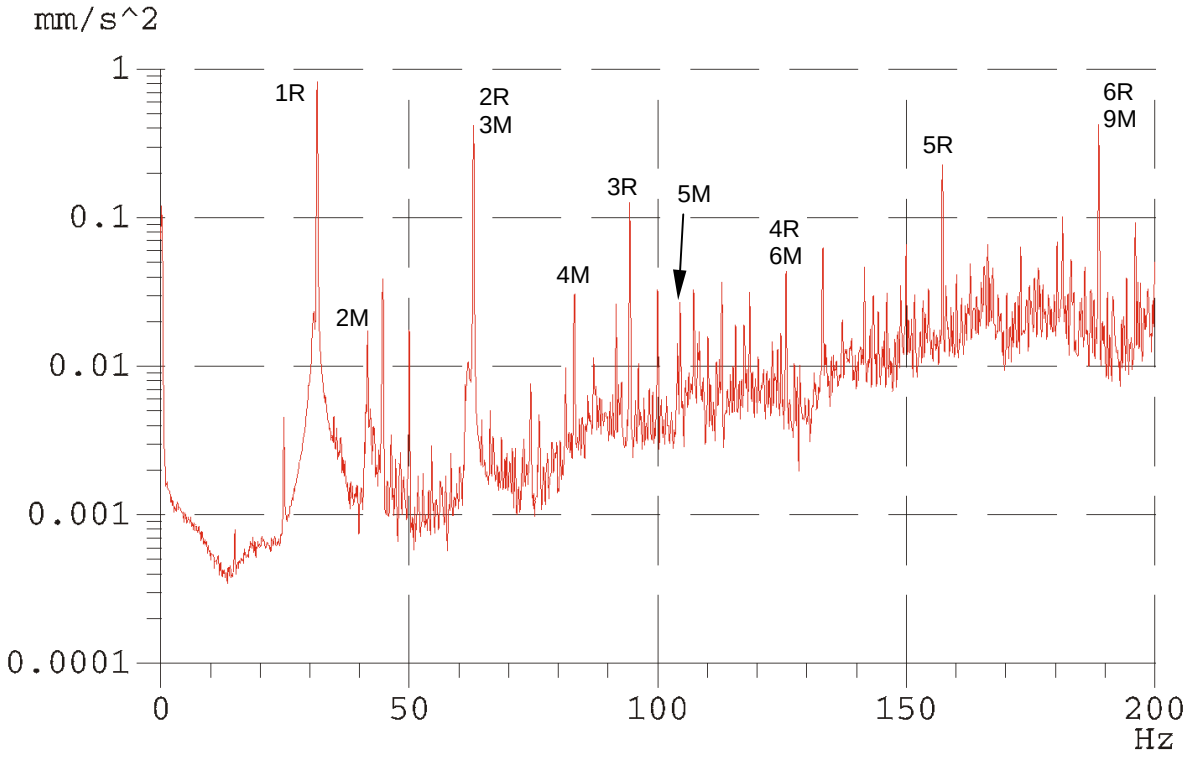


Bild 47: Frequenzspektrum bei 106 m/s.

3.6 Fehlerrechnung

Meßwerte mit zufälligen Fehlern sind meistens „normalverteilt“ (nach einer Gaußschen Glockenkurve Bild 48). Den wahren Wert x_0 kann man nie finden, weil keine Messung unendlich genau ist.

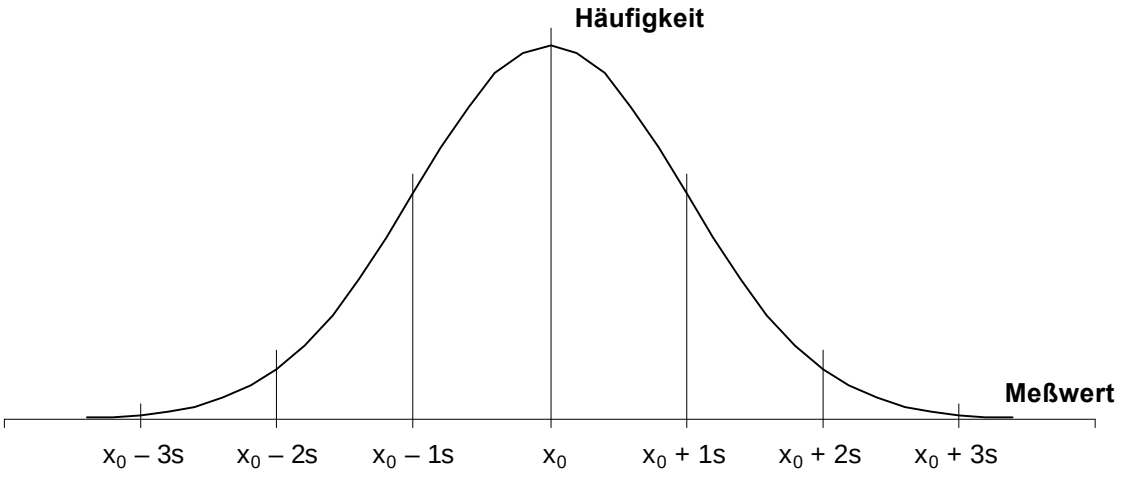


Bild 48: Gaußsche Normalverteilung.

Wenn man sehr viele Meßwerte (z.B. m = 10000) zusammenträgt, dann liegen

68,27% der Meßwerte im Intervall: $x_{mittel} - 1 \cdot s_x < x_i < x_{mittel} + 1 \cdot s_x$,

95,45% der Meßwerte im Intervall: $x_{mittel} - 2 \cdot s_x < x_i < x_{mittel} + 2 \cdot s_x$,

99,73% der Meßwerte im Intervall: $x_{mittel} - 3 \cdot s_x < x_i < x_{mittel} + 3 \cdot s_x$,

der Rest jeweils zu gleichen Teilen unterhalb und oberhalb dieser Intervalle.

Umgekehrt kann man sagen, daß x_0:

mit der Wahrscheinlichkeit P = 68,27% im Intervall $x_{mittel} \pm t \cdot s_x$ (t = 1),

mit der Wahrscheinlichkeit P = 95,45% im Intervall $x_{mittel} \pm t \cdot s_x$ (t = 2),

mit der Wahrscheinlichkeit P = 99,73% im Intervall $x_{mittel} \pm t \cdot s_x$ (t = 3) liegt.

Aus kürzeren Meßreihen erhält man weniger genaue Ergebnisse, d.h., bei festem P muß der Vertrauensbereich, also t größer werden. Die t-Verteilung von W. S. Gosset ist unter dem Pseudonym STUDENT angegeben worden und heißt deshalb STUDENTsche t-Verteilung. Eine t-Verteilung wird verwendet, um Hypothesen bei Vorliegen kleiner Stichproben zu überprüfen (vgl. Einführung in das physikalische Praktikum [8]).

Bei technischen Anwendungsfällen reicht normalerweise eine statistische Sicherheit P von 95% aus. Eine größere Sicherheit macht den absoluten Fehler $\Delta x = t \cdot s_x$ größer.

Es wurde für die Drehzahlmessung des Windungslegers der Fehler bei einer statistischen Sicherheit von 99% berechnet. Selbst bei dieser hohen Sicherheit ist der relative Fehler für alle Meßpunkte kleiner als 0,2%.

Die Drehzahl kann dann angegeben werden:

$n = n_{mittel} \pm t \cdot s$ entspricht

$n = n_{mittel} \pm \Delta n$

Auswertung der Messung vom 17.08.99 bei STFS in Esch/Luxemburg:

Walzge-schwindigkeit	mittlere Drehzahl	Varianz	Standard-abweichung	Meß-punkte	statistische Sicherheit	Student-Verteilung	abs. Fehler	rel. Fehler
v_W	n_{mittel}	s^2	s	m	P	t	Δn	
[m/s]	[min^{-1}]	[min^{-2}]	[min^{-1}]	[1]	[%]	[1]	[min^{-1}]	[%]
80	1495	0,626	0,791	51	99	2,678	± 2,12	0,14
90	1643	0,048	0,219	22	99	2,831	± 0,63	0,04
102	1816	0,506	0,712	30	99	2,756	± 1,97	0,11
104	1852	0,041	0,203	21	99	2,845	± 0,58	0,03
106	1887	0,189	0,435	20	99	2,861	± 1,25	0,07

Alternativ kann der Fehler aus der Differenz des maximalen und minimalen Meßwertes der jeweiligen Drehzahl angegeben werden. Diese Differenz setzt man dann zur mittleren Drehzahl in Bezug. Dabei erhält man einen etwas größere Fehler.

Walzge-schwindigkeit	mittlere Drehzahl	abs. Fehler	rel. Fehler
v_W	n_{mittel}	Δn	
[m/s]	[min^{-1}]	[min^{-1}]	[%]
80	1495	3,50	0,23
90	1643	0,89	0,05
102	1816	3,02	0,17
104	1852	0,85	0,05
106	1887	1,35	0,07

3.7 Meßwerte Motor

Um Auswertungen zum Strömungswiderstand vornehmen zu können, wurde die aufgenommen Motorleistung ermittelt. Dazu wurden Spannungen nach Bild 49 gemessen.

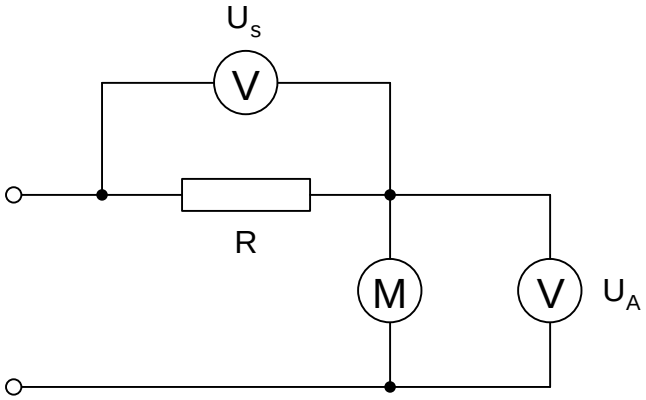


Bild 49: Schaltbild der Leistungsmessung.

Aus der angegebenen Relation des Shunt kann sein elektrischer Widerstand berechnet werden.

$$R = \frac{150\ \text{mV}}{1500\ \text{A}} = 1 \cdot 10^{-4}\,\Omega$$

Nun kann man den Strom und die aufgenommene Motorleistung ermitteln.

$$I = \frac{U_S}{R}$$

$$P = U_A \cdot I$$

Auswertung der Messung vom 17.08.99 bei STFS in Esch/Luxemburg:

Rohrhalter					
Motor	Walzgeschwindigkeit	Shunt-Spannung	Strom	Ankerspannung	Leistung
n	v_W	U_S	I	U_A	P
[1/min]	[m/s]	[mV]	[A]	[V]	[kW]
722	60	6,4	64	204	13,056
850	70	7,3	73	237	17,301
967	80	8,5	85	270	22,950
1087	90	9,8	98	304	29,792
1202	100	11,2	112	336	37,632
1225	102	11,4	114	341	38,874
1248	104	11,7	117	346	40,482
1272	106	12,2	122	356	43,432

Auswertung der Messung vom 17.08.99 bei STFS in Esch/Luxemburg:

Dornwelle					
Motor	Walzgeschwindigkeit	Shunt-Spannung	Strom	Ankerspannung	Leistung
n	v_W	U_S	I	U_A	P
[1/min]	[m/s]	[mV]	[A]	[V]	[kW]
722	60	4,0	40	204	8,160
850	70	4,1	41	237	9,717
967	80	4,3	43	270	11,610
1087	90	4,6	46	304	13,984
1202	100	5,0	50	336	16,800
1225	102	4,9	49	341	16,709
1248	104	5,0	50	346	17,300
1272	106	5,0	50	356	17,800

4. Zusammenfassung

Die theoretische Schwingungsanalyse führte zu dem Ergebnis, daß die Parameter x_4, x_1, x_2, I_1, x_3, m_5, m_4, m_6 und c_2 einen deutlichen Einfluß auf die Eigenfrequenz haben. Bei der Verbesserung der Konstruktion des Windungslegers, sollte vorrangig auf diese Größen geachtet werden.

Um die Loslagersteifigkeit c_2 zu erhöhen, wurde inzwischen von der Firma FAG ein neues Lager entworfen. Dieses Lager hat eine um etwa 40% höhere radiale Steifigkeit und soll in naher Zukunft in einen bestellten Windungsleger eingesetzt werden. Nach den Ergebnissen der theoretischen Schwingungsanalyse, die auf einer Walzgeschwindigkeit von 105 m/s basieren, könnte eine Walzgeschwindigkeit von 111 m/s erreicht werden. Die genaue Auswirkung auf die effektive Schwinggeschwindigkeit ist noch offen.

Angesichts der notwendigen Änderung einiger Abmessungen des Windungslegers um 10% erscheint es schwierig die angestrebten 140 m/s Walzgeschwindigkeit zu erreichen.

Mit der Frequenzanalyse konnte gezeigt werden, daß die Schwingung hauptsächlich auf die Drehfrequenz von Rohrhalter und Motor und deren Harmonische zurückzuführen ist. Dabei ist die erste Harmonische des Rohrhalters durchweg dominant.

Wenn die vorgeschlagenen Größen am Windungsleger geändert werden, sollte in Zukunft nochmals eine Frequenzanalyse durchgeführt werden.

Die Drehzahlerfassung des Betreibers (STFS) ist offensichtlich nicht in Ordnung. Das kann dazu führen, daß die Voreilung des Windungslegers nicht mehr gegeben ist. Somit steht der Draht ab einer Walzgeschwindigkeit von 106 m/s nicht mehr unter Zug und bricht aus. Darin besteht eine Möglichkeit, warum die Anlage bei STFS noch nicht die zugesagte Walzgeschwindigkeit erreicht.

Aus der Korrelation zwischen Motorleistung und Walzgeschwindigkeit läßt sich ableiten, daß der Strömungswiderstand durch Reibung ab einer Umfangsgeschwindgkeit von 73 m/s dominant wird. So steigen die Leelaufverluste von 43 kW bei 106 m/s auf 85 kW bei 140 m/s an.

Bei der theoretischen Untersuchung des Strömungswiderstandes hat sich gezeigt, daß vermutlich ein deutliches Potential für die Reduzierung des Strömungswiderstandes vorhanden ist und daß die Wirbelablösungen einen wesentlichen Anteil an den Strömungsverlusten haben könnten. Eine Verminderung um die Hälfte erscheint bei einer aerodynamischen Optimierung möglich.

Um die bisherigen Erkenntnisse über die Strömungsverhältnisse zu untermauern, wäre eine Sichtbarmachung der Strömung durch eine Rauchsonde oder an dem Windungsleger befestigte Fäden denkbar.

5. Literaturverzeichnis

[1] Bohl, Willi: Technische Strömungslehre, Vogel Verlag, Würzburg 1991

[2] Schade H., Kunz E.: Strömungslehre, Walter de Gruyter, Berlin, New York 1989

[3] Schlichting H., Gersten K.: Grenzschicht-Theorie, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1997

[4] Bartsch, Hans-Jochen: Taschenbuch mathematischer Formeln, Fachbuchverlag Leipzig 1997

[5] Autorenkollektiv, Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg: Walzwerke, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

[6] VDI 2056 (ISO 2372): Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen, Oktober 1964

[7] Bergmann, Frank: mündliche Information zu den Arbeitsunterlagen, 1998

[8] Diederichs, Eberhard : Einführung in das physikalische Praktikum, Fachhochschule Düsseldorf

[9] Fricke J., Kameier F., Reinartz D.: Untersuchung von strömungserregten Schwingungen an zwei unterschiedlichen Windungslegern, Meßbericht, 1998

[10] Zeichnungen, Bilder und Photos von der Firma SMS Demag AG

[11] PAFEC Ltd: PAFEC–FE Level 8, Nottingham 1994

[12] Vibrations Mät Instruments: Analyse der kritischen Drehzahl an unterschiedlichen Windungslegervarianten, Meßbericht, 1999

Beilage zur Diplomarbeit

Name: Kleinefeldt
Vorname: Andreas
Matr.-Nr.: 316748

Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, daß ich die vorgelegte Diplomarbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und ausschließlich die im Literaturverzeichnis angegebenen Schriften benutzt habe.

Datum: ..... Unterschrift: .....